

HALLITUSTENVÄLINEN ILMASTONMUUTOSPANEELI (IPCC)

ILMASTONMUUTOS V. 2021:

LUONNONTIETEELLINEN PERUSTA

YHTEENVETO PÄÄTÖKSENTEKIJÖILLE SUOMEKSI

Ensimmäisen työryhmän osuus IPCC:n 6. arviointiraportissa

Tämän epävirallisen suomenkielisen tekstin on laatinut Ilmatieteen laitoksen tutkija Kimmo Ruosteenoja.

Englanninkielinen yhteenveto “IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.” on saatavissa IPCC:n verkkosivustolta (<http://www.ipcc.ch>). Tällä verkkosivustolla on luettavissa myös raportti kokonaisuudessaan.

ESIPUHE

Suomennettaessa tätä IPCC-raportin päätöksentekijöitä varten laadittua yhteenvetoa tavoitteena on ollut yhtäältä saada alkuperäisen tekstin sanoma välittymään mahdollisimman muuttumattomana ja toisaalta tuottaa ymmärrettävää ja lukukelpoista suomenkielistä tekstiä. Sen tähden englanninkielisiä lauserakenteita ei ole yritetty suoraan seurata, koska se estäisi järkevien suomenkielisten lauseitten synnyn. Alkuperäisen tekstin pitkiä lauseita on tarvittaessa pilkottu. Tieteellisiä erityiskäsitteitä on pyritty käyttämään säästeliäästi ja sen sijaan on suosittu yleiskielisiä ilmaisuja. Kansantajuisuuden nimissä joitakin vähemmän keskeisiä vaikeatajuisia tieteellisiä yksityiskohtia on sivuutettu, ja myös pienipiirteistä vertailua IPCC:n aikaisempiin raportteihin on jätetty pois. Toisaalta maallikolle muutoin hämäräksi jääviä asioita on paikoin selitetty hieman alkuperäistä esitystä laveammin. Muutamassa kohdassa asiat oli ilmaistu alkuperäisessä tekstissä kovin hankalasti, ja noitten kohtien kirjoittaminen suomeksikin oli vaikeaa.

Tämä suomenkielinen teksti on luonteeltaan epävirallinen. Erityisesti kaikissa sellaisissa käyttötarkoituksissa, joihin voi liittyä oikeudellisia seuraamuksia, asiat on syytä aina tarkistaa alkuperäisestä tekstistä. Suomenkielinen teksti on tarkoitettu nimenomaan sellaisille ihmisille, joita kiinnostaa raportin **asiasisältö**: tiedotusvälineitten edustajille, poliitikoille, virkamiehille, talouselämän palveluksessa oleville, opettajille ja opiskelijoille, yksittäisille kansalaisille, jne.

Suomenkielisen version kehittämiseen ja tarkastamiseen ovat osallistuneet allekirjoittaneen ohella Tiina Ervasti ja Heikki Tuomenvirta.

13.4.2022

Kimmo Ruosteenoja

As an UN body the IPCC publishes reports only in the six official UN languages. This Finnish version of the “Summary for Policymakers” of “Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.” is not an official translation. It has been provided by the Finnish Meteorological Institute.

Johdanto

Tämä päätöksentekijöille tarkoitettu yhteenveto (“Summary for Policymakers”, lyhenne “SPM”) esittelee keskeisimmät ilmastomuutoksen luonnontieteellistä perustaa koskevat tulokset, jotka sisältyvät työryhmä I:n tuottamaan osuuteen Hallitustenvälisen ilmastomuutospaneelin (IPCC) kuudennessa arviointiraportissa (AR6)¹. Raportti perustuu vuonna 2013 ilmestyneeseen IPCC:n viidenteen arviointiraporttiin (AR5), vuosina 2018–2019 ilmestyneisiin erityisraportteihin² sekä uudempaan ilmastotutkimusta käsittelevään tieteelliseen kirjallisuuteen³.

Yhteenveto auttaa ymmärtämään ilmaston nykyistä tilaa ja tähänastisia muutoksia sekä ihmisten toiminnan vaikutuksia ilmastoon. Lisäksi arvioidaan nykyisen tietämyksen pohjalta ilmaston tulevia muutoksia niin maailmanlaajuisesti kuin eri alueillakin. Lopuksi esitetään laskelmia, miten paljon ilmakehään vielä voidaan päästää hiilidioksidia, jos maapallon lämpeneminen halutaan saada rajoitettua puoleentoista tai kahteen asteeseen verrattuna teollistumista edeltävään aikaan.

Alkuperäisessä tekstissä keskeiset päätelmät on esitetty käyttäen IPCC:n omaa luottamustasoasteikkoa⁴. Luettavuuden parantamiseksi näitä “virallisia” määritelmiä käytetään tässä suomenkielisessä versiossa säästeliäästi, mutta tilanteen niin vaatiessa tuodaan kyllä muutoin esiin, milloin joku tulos on luonteeltaan epävarma.

Jokaisen keskeisen tuloksen tieteellinen perusta on esitetty jossakin pääraportin luvussa tai raportin teknillisessä yhteenvedossa (“Technical Summary”, lyhenne “TS”). Viittaukset näihin raportin kohtiin on ilmoitettu aaltosulkujen sisällä. Tähän raporttiin liittyy myös vuorovaikutteinen verkkotyökalu (“atlas”), joka helpottaa keskeisten tulosten tarkastelua erityisesti alueellisella tasolla.⁵

A. Ilmaston nykyinen tila

IPCC:n viidennen arviointiraportin julkaisemisen jälkeen havaintotietoa on kertynyt lisää ja tietomme maapallolla muinoin vallinneesta ilmastosta on syventynyt. Näin on saatu muodostettua entistä kattavampi käsitys ilmastojärjestelmän eri osista ja niitten tähänastisista muutoksista. Uudet analyysit ja ilmastomallisimulaatiot sekä eri tietolähteitten samanaikainen tarkasteleminen auttavat ymmärtämään ihmiskunnan toimien vaikutuksia entistä paremmin. Tämä koskee niin keskimääräistä ilmastoa kuin erilaisia

¹Päätös nro IPCC/XLVI-2.

²Mainitut kolme erityisraporttia ovat: (1) Maapallon ilmaston lämpeneminen 1,5 asteella: IPCC:n erityisraportti maailmanlaajuisista kasvihuonekaasupäästöistä ja ilmaston lämpenemisen vaikutuksista, jos maapallon keskilämpötila nousee 1,5 asteella teollistumista edeltävään aikaan verrattuna (SR1.5); (2) Ilmastomuutos ja maa-alueet: IPCC:n erityisraportti ilmastomuutoksesta, aavikoitumisesta, maaperän köyhtymisestä, kestävästä maankäytöstä, elintarviketurvallisuudesta ja kasvihuonekaasujen voista maaekosysteemeissä (SRCCCL); (3) IPCC:n erityisraportti valtameristä sekä jää- ja lumipeitteestä muuttuvassa ilmastossa (SROCC).

³Arviointiraporttia laadittaessa mukaan on otettu sellaisia tieteellisiä tutkimuksia, jotka olivat valmiita julkaistaviksi 31.1.2021 mennessä.

⁴Englanninkielisessä versiossa käytetty luottavuusasteikko: “very low confidence”, “low confidence”, “medium confidence”, “high confidence” ja “very high confidence”. Monissa tapauksissa esitetyille tuloksille ja johtopäätöksille on annettu myös todennäköisyysarvio: käytännössä varma (virtually certain), kun muutoksen tms. todennäköisyys on 99–100 %; hyvin todennäköinen (very likely), 90–100 %; todennäköinen (likely), 66–100 %; todennäköisyys yhtä suuri puolesta ja vastaan (about as likely as not), 33–66 %; epätodennäköinen (unlikely), 0–33 %; hyvin epätodennäköinen (very unlikely), 0–10 %; äärimmäisen epätodennäköinen (exceptionally unlikely), 0–1 %. Näitten ohella raportissa on käytetty eräitä muitakin todennäköisyyksien määritelmiä (esim. erittäin todennäköinen, 95–100 %; ja erittäin epätodennäköinen, 0–5 %). Ellei toisin mainita, tässä yhteenvedossa on ilmaistu hakasuluissa [x – y] “erittäin todennäköinen” eli 90 %:n epävarmuusväli.

⁵Vuorovaikutteinen atlas on nähtävissä verkko-osoitteessa <https://interactive-atlas.ipcc.ch>.

sään ja ilmaston ääri-ilmiöitäkin.

A.1 Voidaan varmuudella sanoa, että ihmisten toimet ovat lämmittäneet ilmakehää, meriä ja maaperää. Tämän seurauksena ilmakehässä, valtamerissä, jää- ja lumipeitteessä ja elävässä luonnossa on havaittu laaja-alaisia ja nopeita muutoksia.

{2.2, 2.3, yhdistävä tekstilaatikko 2.3, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.8, 5.2, 5.3, 6.4, 7.3, 8.3, 9.2, 9.3, 9.5, 9.6, yhdistävä tekstilaatikko 9.1}(kuvat SPM.1 ja SPM.2)

A.1.1 Hyvin sekoittuneitten kasvihuonekaasujen pitoisuuksien havaittu nousu ilmakehässä 1700-luvulta tähän päivään on aivan varmasti aiheutunut ihmisten toiminnasta. Vuoden 2011 jälkeen pitoisuudet ovat edelleen kohonneet, ja vuonna 2019 keskeisimpien kasvihuonekaasujen pitoisuudet olivat: hiilidioksidi (CO_2) – 410 miljoonasosaa (ppm); metaani (CH_4) – 1866 miljardisosaa (ppb); dityppioksidi (N_2O) – 332 ppb.⁶ Viimeksi kuluneitten 60 vuoden aikana maaperä, kasvillisuus ja valtameret ovat sitoneet itseensä noin 56 % ihmiskunnan tuottamista hiilidioksidipäästöistä.⁷
{2.2, 5.2, 7.3, TS.2.2, tekstilaatikko TS.5}

A.1.2 Jokainen viimeksi kuluneista neljästä vuosikymmenestä on ollut vuorollaan lämpimämpi kuin mikään sitä edeltävä vuosikymmen ainakaan vuodesta 1850 lähtien. Maapallon keskimääräinen pintalämpötila⁸ oli 2000-luvun kahdella ensimmäisellä vuosikymmenellä (v. 2001–2020) 0,99 [0,84–1,10] °C korkeampi kuin vuosina 1850–1900⁹. Vuosina 2011–2020 maapallon keskilämpötila oli jo 1,09 [0,95–1,20] °C korkeampi kuin v. 1850–1900, ja lämpötilan nousu näitten jaksojen välillä oli suurempi mantereilla (1,59 [1,34–1,83] °C) kuin merialueilla (0,88 [0,68–1,01] °C). Maapallon keskilämpötilan suurempi nousu verrattuna edellisessä arviointiraportissa esitettyyn arvioon johtuu pääasiassa lämpenemisen jatkumisesta tuon raportin laatimisen jälkeen (vaikutus +0,19 [0,16–0,22] °C). Lisäksi analyysimenetelmien kehittyminen ja uudet havaintotiedot ovat nostaneet lämpenemisarviota noin 0,1 asteella.¹⁰
{2.3, yhdistävä tekstilaatikko 2.3} (kuva SPM.1)

A.1.3 Puhtaasti ihmiskunnan toimista aiheutunut maapallon keskilämpötilan nousu jaksojen 1850–1900 ja 2010–2019¹¹ välillä on laskelmien mukaan ollut 1,07 [0,8–1,3] °C. On todennäköistä, että tällä aikavälillä hyvin sekoittuneet kasvihuonekaasut aiheuttivat lämpenemistä 1,0–2,0 asteen verran, kun taas muut ihmisten tuottamat päästöt (pääasiassa pienhiukkaset) jäädyttivät maapalloa 0,0–0,8 asteella. Luonnolliset pakotetekijät muuttivat maapallon pintalämpötilaa korkeintaan ±0,1 asteella

⁶Eräitten muitten kasvihuonekaasujen pitoisuuksia vuonna 2019: perfluorihilivedyt (PFC) – 109 biljoonasosaa (ppt) CF_4 -ekvivalenttina; rikkiheksafluoridi (SF_6) – 10 ppt; typpitrifluoridi (NF_3) – 2 ppt; osittain halogenisoidut fluorihilivedyt (HFC:t) – 237 ppt HFC-134a-ekvivalenttina; muut Montrealin pöytäkirjassa mainitut kaasut (pääasiassa kloorifluorihilivedyt (CFC) ja osittain halogenisoidut kloorifluorihilivedyt (HCFC)) – 1032 ppt CFC-12-ekvivalenttina. Vuodesta 2011 vuoteen 2019 CO_2 :n pitoisuus on noussut 19 ppm, CH_4 -pitoisuus 63 ppb ja N_2O -pitoisuus 8 ppb.

⁷Muille kasvihuonekaasuille kuin hiilidioksidille maa ja meret eivät toimi merkittävinä nieluina.

⁸Maapallon keskimääräinen pintalämpötila voi tarkoittaa joko fyysisen maapallon pinnan tai pinnan läheisen ilmakerroksen lämpötilan maailmanlaajuisia keskiarvoja. Näitten kahden suuren ajalliset muutokset eroavat toisistaan enintään 10 %. {Yhdistävä tekstilaatikko TS.1}

⁹Vuodet 1850–1900 muodostavat varhaisimman ajanjakson, jolta on käytettävissä riittävästi lämpötilahavaintoja maapallon keskilämpötilan arvioimiseksi. Sen tähden tuota jaksoa käytetään kuvaamaan esiteollisten ajan olosuhteita.

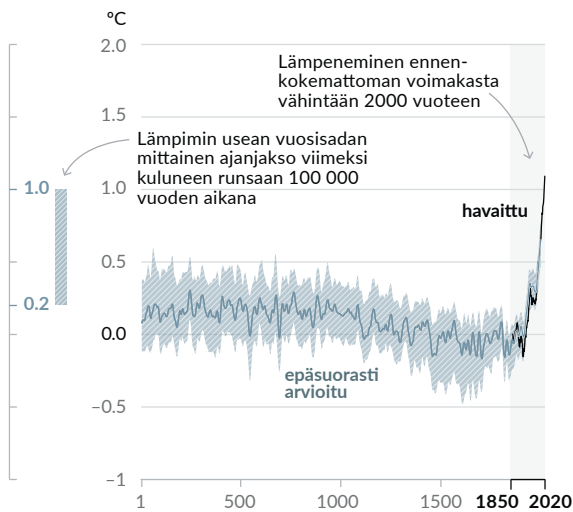
¹⁰Edellisen arviointiraportin ilmestymisen jälkeiset edistysaskeleet analyysimenetelmissä ja uudet havaintotiedot ovat tarkentaneet käsitystämme pintalämpötilan muutoksista maailman eri alueilla, myös napaseuduilla. Nämä menetelmälliset parannukset ovat suurentaneet arvioitamme maapallon keskilämpötilan tähänastisesta muutoksesta noin 0,1 asteella.

¹¹Ajanjakso on hiukan eri kuin kohdassa A.1.2, sillä tätä hieman aikaisempaa jaksoa on käytetty useissa ilmastomuutoksen syitä tarkastelevissa tutkimuksissa. Jaksoa 2010–2019 vastaava havaittu lämpeneminen on 1,06 [0,88–1,21] °C.

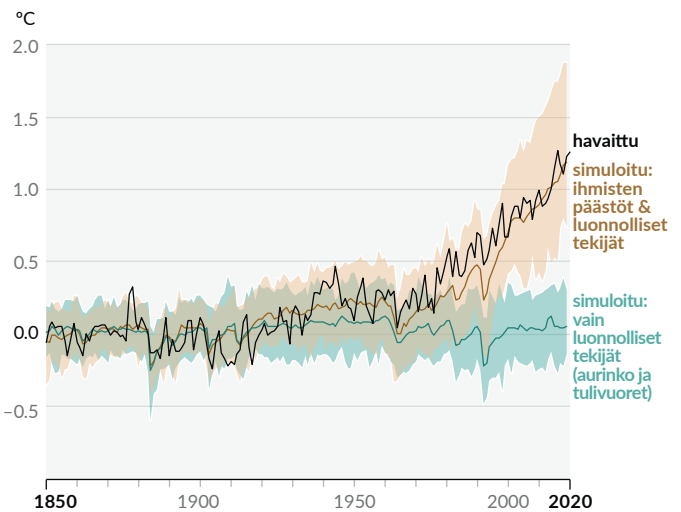
Ihmisten tuottamat päästöt ovat lämmittäneet ilmastoa niin paljon, että näin nopeaa lämpiämistä ei ole koettu ainakaan 2000 vuoteen

Maapallon keskilämpötilan muutokset verrattuna vuosien 1850–1900 ilmastoon

(a) Maapallon keskilämpötilan muutos (10 vuoden jaksojen keskiarvoja) epäsuorasti arvioituna (v. 1–2000) ja havaintojen perusteella (v. 1850–2020)



(b) Maapallon keskilämpötilan muutos (vuotuinen keskiarvo) havaintojen mukaan ja mallien simuloimana käyttäen pakotteena sekä ihmisten päästöjä että luonnollisia tekijöitä ja vain luonnollisia tekijöitä (v. 1850–2020)



Kuva SPM.1. Maapallon keskilämpötilan havaitut muutokset ja viimeaikaisen lämpenemisen selittyminen.

Kuvaosio (a): Maapallon keskilämpötilan muutokset epäsuoran havaintotiedon (vuodet 1–2000; yhtenäinen sinisenharmaa viiva) ja lämpömittarihavaintojen perusteella (vuodet 1850–2020; yhtenäinen musta viiva); molemmat kymmenen vuoden keskiarvoja, vertailukohtana vuosien 1850–1900 keskilämpötila. Si-nertävä varjostus kuvaa epäsuoran tiedon perusteella laskettujen lämpötilojen epävarmuusväliä. Kuvan vasemmalla puolella oleva pylväs kertoo arvioidun lämpötilan noin 6500 vuotta sitten, jolloin ilmasto oli lämpimimmillään viimeisten 100 000 vuoden aikana. Sitä edellisen kerran korkeita lämpötiloja koettiin jääkausien välisenä aikana noin 125 000 vuotta sitten. Nämä varhaisemmat lämpimät jaksot ovat aiheu-tuneet ensisijaisesti maapallon kiertoradan hitaista, tuhansien vuosien kuluessa tapahtuneista vaihteluista.

Kuvaosio (b): Maapallon keskilämpötilan muutokset viimeksi kuluneitten 170 vuoden aikana verrattu-na vuosien 1850–1900 keskilämpötilaan (musta viiva) ja vastaavat ilmastomallien simuloimat lämpötilan muutokset (ks. tekstilaatikko SPM.1). Ruskea käyrä kuvaa mallikokeita, joissa on otettu huomioon sekä luonnolliset tekijät että ihmiskunnan tuottamat päästöt. Sinertävänvihreän käyrän kuvaamissa malliko-keissa ovat mukana ainoastaan luonnolliset pakotetekijät, eli auringon säteilyn vaihtelut ja tulivuorenpur-kaukukset. Värilliset viivat kuvaavat mallitulosten keskiarvoja ja varjostetut alueet eri mallien tulosten eroja. Eri pakotetekijöitten osuuksia lämpenemisen selittäjinä on tarkasteltu kuvassa SPM.2.

{2.3.1; yhdistävä tekstilaatikko 2.3; 3,3; TS.2.2; yhdistävä tekstilaatikko TS.1, kuva 1a}

ja ilmastojärjestelmän sisäisen vaihtelun osuus on ollut $\pm 0,2$ °C. Hyvin sekoittuneet kasvihuonekaasut ovat myös olleet pääasiallinen troposfäärin lämpenemistä aiheuttava pakotetekijä¹² vuodesta 1979 lähtien. Stratosfäärin alaosan jäähtyminen vuodesta 1979 1990-luvun puoliväliin asti taas johtui pääasiallisesti ihmisten aiheuttamasta stratosfäärin otsonikadosta.
{3.3, 6.4, 7.3, TS.2.3, yhdistävä tekstilaatikko TS.1} (kuva SPM.2)

A.1.4 Maapallon manneralueitten keskimääräinen sademäärä on todennäköisesti lisääntynyt vuodesta 1950 alkaen, ja kasvu on nopeutunut 1980-luvun jälkeen. On todennäköistä, että ihmisten tuottamat päästöt ovat vaikuttaneet sademäärien muutosten alueelliseen jakaumaan 1900-luvun puolivälistä lähtien ja erittäin suurella todennäköisyydellä myös merien ylimpien vesikerroksen suolapitoisuuden muutoksiin. Keskileveysasteitten myrskyradat ovat todennäköisesti siirtyneet molemmilla pallonpuoliskolla kohti napoja 1980-luvulta lähtien, mutta muutokset ovat olleet erilaisia vuodenaikasta riippuen. Myös eteläisen pallonpuoliskon keskileveysasteitten suihkuvirtaus on siirtynyt kesällä kohti etelää.

{2.3, 3.3, 8.3, 9.2, TS.2.3, TS.2.4, tekstilaatikko TS.6}

A.1.5 Ihmisten toiminta on hyvin todennäköisesti ollut keskeisin jäätiköiden maailmanlaajuisen kutistumisen aiheuttaja 1990-luvulta lähtien, ja sama koskee pohjoisten merien jääpeitteen katoa jaksojen 1979–1988 ja 2010–2019 välillä; syyskuussa merijään pinta-ala on pienentynyt noin 40 % ja maaliskuussa 10 %. Etelämannerta ympäröivillä merillä jään pinta-alassa ei ole vuosina 1979–2020 ollut havaittavissa tilastollisesti merkitsevää trendiä, sillä eri alueitten trendit ovat olleet vastakkaisuuntaisia ja vaihtelut vuodesta toiseen suuria. Ihmiskunnan tuottamat päästöt ovat hyvin todennäköisesti vaikuttaneet pohjoisen pallonpuoliskon keväisen lumipeitteen vähenemiseen vuodesta 1950 lähtien ja Grönlannin jäätikön pinnan sulamiseen viimeisten 20 vuoden aikana. Toisaalta ihmisten osuudesta Etelämantereen jäätikön massakadon aiheuttajina on vain niukalti näyttöä.

{2.3, 3.4, 8.3, 9.3, 9.5, TS.2.5}

A.1.6 Valtamerien ylimmät kerrokset 700 m syvyyteen asti ovat lämmenneet 1970-luvulta lähtien, ja on erittäin todennäköistä, että ihmisten tuottamat päästöt ovat lämpenemisen keskeinen syy. Lisäksi hiilidioksidin päästöt ovat syypäänä meneillään olevaan meriveden happamoimiseen. Monilla merialueilla ylimpien vesikerrosten happipitoisuudet ovat laskeneet 1900-luvun puolivälin jälkeen.

{2.3, 3.5, 3.6, 5.3, 9.2, TS.2.4}

A.1.7 Vuosina 1901–2018 meren pinta nousi maapallolla keskimäärin 0,20 [0,15–0,25] metriä. Merenpinnan keskimääräinen nousunopeus oli vuosina 1901–1971 1,3 [0,6–2,1] millimetriä vuodessa, vuosina 1971–2006 1,9 [0,8–2,9] mm/v ja vuosina 2006–2018 jo 3,7 [3,2–4,2] mm/v. Ihmisten tuottamat päästöt ovat hyvin todennäköisesti olleet tämänkin muutoksen tärkein aiheuttaja ainakin vuodesta 1971 lähtien.

{2.3, 3.5, 9.6, yhdistävä tekstilaatikko 9.1, tekstilaatikko TS.4}

A.1.8 Manneralueitten elollisessa luonnossa vuoden 1970 jälkeen havaitut muutokset ovat hyvin sopusoinnussa ilmaston havaitun lämpenemisen kanssa. Molemmilla pallonpuoliskoilla ilmastovyöhykkeet ovat siirtyneet kohti napoja, ja pohjoisen pallonpuoliskon tropiikin ulkopuolisilla alueilla kasvukausi on pidentynyt 1950-luvulta lähtien keskimäärin kahdella päivällä vuosikymmenessä.

{2.3, TS.2.6}

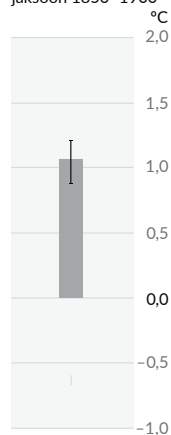
A.2 Monet viime aikoina havaitut ilmastojärjestelmän muutokset ovat olleet niin laajoja ja nopeita, että mitään vastaavaa ei ole koettu ainakaan satoihin tai tuhansiin vuosiin.

¹²Tässä yhteenvedossa “pääasiallinen pakotetekijä” tarkoittaa pakotetta, joka aiheuttaa yli 50 prosenttia muutoksesta.

Havaittu lämpeneminen johtuu ihmisten tuottamista päästöistä. Pienhiukkasten jäähdyttävä vaikutus peittää osittain kasvihuonekaasujen aiheuttaman lämpenemisen.

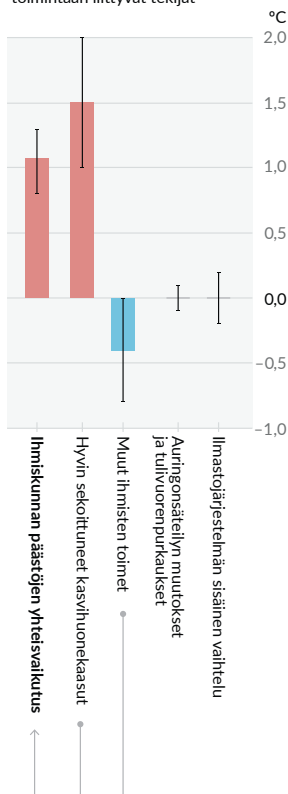
Havaittu lämpeneminen

(a) Havaittu lämpeneminen v. 2010–2019 verrattuna jaksoon 1850–1900

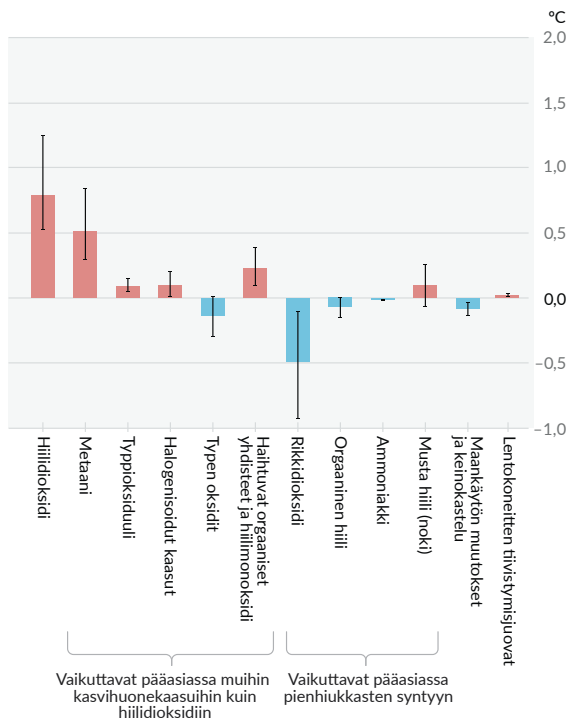


Lämpenemistä aiheuttavat tekijät jaoteltuina kahdella eri tavalla

(b) Havaittua lämpenemistä selittävät luonnolliset ja ihmisten toimintaan liittyvät tekijät



(c) Lämpenemisen selittyminen ihmiskunnan aiheuttamilla pakotetekijöillä



Kuva SPM.2. Eri tekijöitten arvioidut osuudet tähänastisen (1850–1900 → 2010–2019) havaitun lämpenemisen selittäjinä.

Kuvaosio (a): Havaittu maapallon keskilämpötilan nousu. Pystyjana pylvään päässä kuvaa muutoksen epävarmuusarviota.

Kuvaosio (b): Eri tekijöitten osuudet havaitun lämpenemisen selittäjinä. Osuuksia on arvioitu vertaamalla ilmastomallien tuloksia havaintotietoihin. Kuva näyttää sen osuuden lämpötilan muutoksesta, joka on aiheutunut ihmiskunnan päästöistä yhteensä (1. pylväs), hyvin sekoittuneitten kasvihuonekaasujen pitoisuuksien muutoksista (2. pylväs), ihmisten muista toiminnoista, eli pienhiukkasten ja otsonin pitoisuuksien ja maankäytön muutoksista (3. pylväs), auringonsäteilyn muutoksista ja tulivuorenpurkauksista (4. pylväs) ja ilmastojärjestelmän sisäisestä vaihtelusta (5. pylväs). Pystyjanat kuvaavat eri tekijöihin liittyvää epävarmuutta.

Kuvaosio (c): Maapallon keskilämpötilan tähänastisen muutoksen selittyminen yksittäisten kasvihuonekaasujen päästöillä (pylväät 1–6), pienhiukkasten ja niitä synnyttävien yhdisteitten päästöillä (pylväät 7–10), maankäytön muutoksilla (maanpinnan heijastuskyvyn muuttuminen ja keinokastelun vaikutus, 11. pylväs) ja lentokoneitten tiivistymisjuovilla (12. pylväs). Mustat pystyjanat kuvaavat eri tekijöihin liittyvää epävarmuutta. Arvioissa on otettu huomioon sekä päästöjen välitön vaikutus ilmakehässä että mahdolliset välilliset vaikutukset muihin ilmastoa muuttaviin pakotetekijöihin. Pienhiukkasia tarkasteltaessa otetaan huomioon sekä niiden suorat (hiukkaset itsessään lisäävät auringonsäteilyn heijastumista) että epäsuorat vaikutukset (vaikutus pilvien elinikään ja pisaroitten kokojakaumaan).

{Yhdistävä tekstilaatikko 2.3, 3.3.1, 6.4.2, 7.3}

{2.2, 2.3, yhdistävä tekstilaatikko 2.1, 5.1} (kuva SPM.1)

A.2.1 Vuonna 2019 ilmakehän CO₂-pitoisuudet olivat korkeampia kuin milloinkaan vähintään kahteen miljoonaan vuoteen, ja CH₄- ja N₂O-pitoisuudet olivat suurempia kuin kertaakaan 800 000 vuoteen. Vuoden 1750 jälkeen koettu hiilidioksidin (47 %) ja metaanin (156 %) pitoisuuksien nousu ylittää huomattavasti jääkausien ja niiden välisten leudomprien ajanjaksojen välillä esiintyneet luonnolliset vaihtelut ainakin viimeksi kuluneitten 800 000 vuoden aikana. N₂O:n pitoisuuden nousu (23 %) on samaa suuruusluokkaa näitten luonnollisten vaihteluitten kanssa.

{2.2, 5.1, TS.2.2}

A.2.2 Maapallon keskilämpötila on noussut vuodesta 1970 lähtien nopeammin kuin minkään muun 50 vuoden mittaisen ajanjakson aikana ainakaan 2000 vuoteen. Viime vuosikymmenen (2011–2020) lämpötilat ylittävät edellisen, noin 6500 vuotta sitten¹³ koetun usean vuosisadan pituisen lämpimän ajanjakson lämpötilat. Tuolloin maapallon keskilämpötilan arvellaan olleen 0,2–1 °C korkeampi kuin vuosina 1850–1900. Sitä edellinen hyvin lämmin kausi osui aikaan noin 125 000 vuotta sitten, jolloin lämpötilat olivat 0,5 °C – 1,5 °C korkeampia kuin v. 1850–1900. Tuolloin maapallon keskilämpötila siis saattoi olla suunnilleen yhtä korkea kuin nykyisin.

{2.3, yhdistävä tekstilaatikko 2.1, yhdistävä tekstilaatikko TS.1} (kuva SPM.1)

A.2.3 Vuosina 2011–2020 pohjoisten merien vuotuinen keskimääräinen jääpeitteen pinta-ala oli pienimmillään ainakin sitten vuoden 1850. Loppukesällä jäätä oli vähemmän kuin koskaan viimeksi kuluneitten tuhannen vuoden aikana. Vuoristojen jäätiköt ovat kutistuneet 1950-luvulta lähtien lähes kaikkialla maapallolla. Tällaista maailmanlaajuista sulamista ei ole koettu ainakaan 2000 vuoteen.

{2.3, TS.2.5}

A.2.4 Keskimääräinen maailmanlaajuinen merenpinnan korkeus on noussut vuodesta 1900 lähtien nopeammin kuin minkään aikaisemman vuosisadan aikana ainakaan 3000 vuoteen. Samalla meret ovat lämmenneet nopeammin kuin koskaan viime jääkauden päättymisvaiheen jälkeen (noin 11 000 vuotta sitten). Meriveden pinnan pH-arvo on viimeisten 50 miljoonan vuoden aikana pitkällä aikavälillä noussut mutta kääntynyt viime aikoina nopeaan laskuun (eli happamuus on lisääntynyt). Yhtä alhaisia pH-arvoja kuin viime vuosikymmeninä on esiintynyt viimeisten 2 miljoonan vuoden aikana vain poikkeuksellisesti.

{2.3, TS.2.4, tekstilaatikko TS.4}

A.3 Ihmisten toiminnan aiheuttama ilmastonmuutos vaikuttaa jo nykyisin erilaisten sään ja ilmaston ääri-ilmiöitten esiintymiseen eri puolilla maailmaa. Tällaisia ääri-ilmiöitä ovat mm. helleaallot, rankkasateet, kuivuus ja trooppiset hirmumyrskyt. Tieteellinen näyttö ääri-ilmiöitten muutoksista ja erityisesti ihmiskunnan päästöjen vaikutuksesta on edelleen vahvistunut IPCC:n edellisen arviointiraportin ilmestymisen jälkeen.

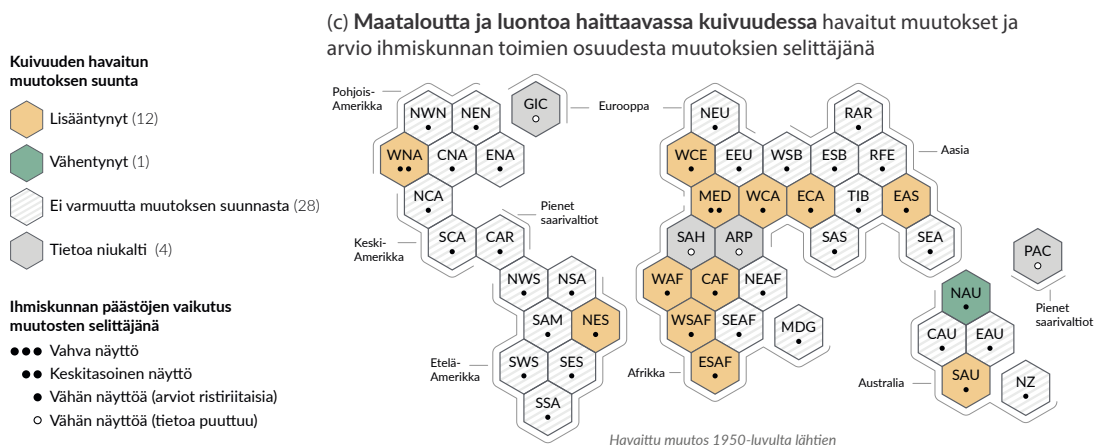
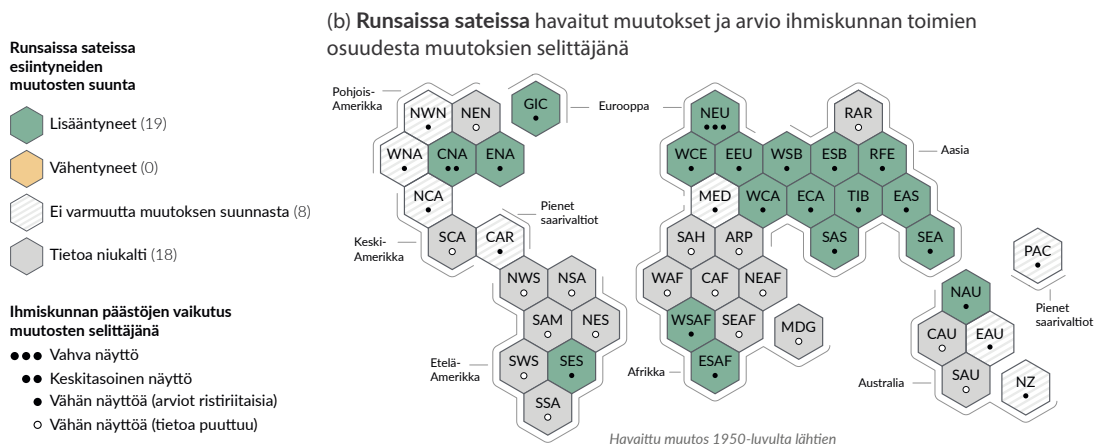
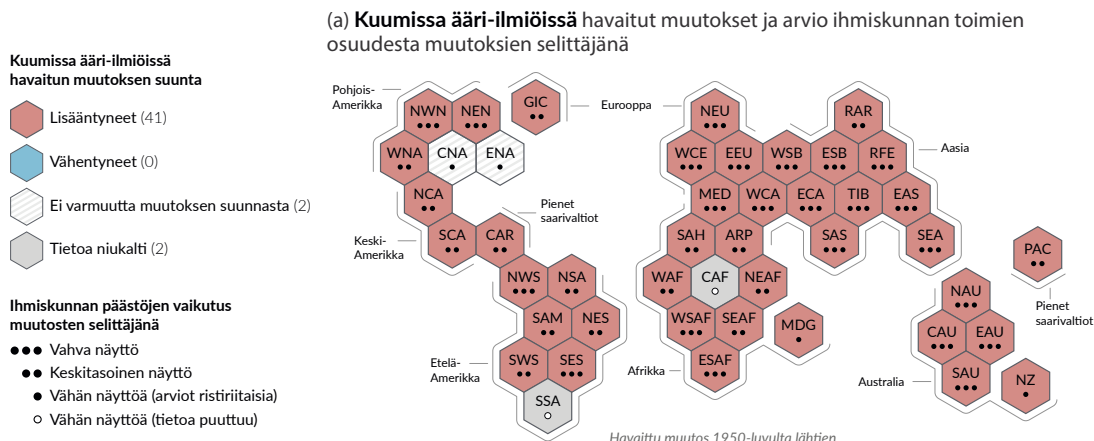
{2.3, 3.3, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6, tekstilaatikko 8.1, tekstilaatikko 8.2, tekstilaatikko 9.2, 10.6, 11.2, 11.3, 11.4, 11.6, 11.7, 11.8, 11.9, 12.3} (kuva SPM.3)

A.3.1 On lähes varmaa, että ankarat helleaallot ovat 1950-luvun jälkeen yleistyneet ja voimistuneet useimmilla maa-alueilla, kun taas äärimmäisen kylmät säätilanteet ovat käyneet harvinaisemmiksi ja leppeämmiksi. Näiden muutosten tärkein aiheuttaja on ilmastonmuutos¹⁴. Viimeksi kuluneen

¹³Kuten kohdassa B.1 todetaan, jopa erittäin alhaisten päästöjen SSP1-1.9-skenaarion toteutuessa lämpötilojen arvioidaan pysyttelevän viime vuosikymmenen tason yläpuolella ainakin vuoteen 2100 asti ja olevan siten korkeampia kuin 6500 vuotta sitten.

¹⁴Kuten alaviitteessä 12 todettiin, tässä yhteenvedossa ”tärkein aiheuttaja” tai ”pääasiallinen pakotetekijä” tarkoittaa sellaista vaikuttavaa tekijää, joka on vastuussa yli 50 prosentista muutoksesta.

Ilmastonmuutos tuntuu jo kaikkialla maailmassa, ja ihmistoiminnan vaikutus nähdään monissa havaituissa sään ja ilmaston ääri-ilmiöissä.



Jokainen kuusikulmio vastaa yhtä IPCC-raportissa (AR6) käytettyä tarkastelualuetta

NWN North-Western North America

IPCC:n AR6 WG1 -raportissa käytetty aluejako ja lyhenteet englanniksi: **North America:** NWN (North-Western North America), NEN (North-Eastern North America), WNA (Western North America), CNA (Central North America), ENA (Eastern North America), **Central America:** NCA (Northern Central America), SCA (Southern Central America), CAR (Caribbean), **South America:** NWS (North-Western South America), NSA (Northern South America), NES (North-Eastern South America), SAM (South American Monsoon), SWS (South-Western South America), SES (South-Eastern South America), SSA (Southern South America), **Europe:** GIC (Greenland/Iceland), NEU (Northern Europe), WCE (Western and Central Europe), EEU (Eastern Europe), MED (Mediterranean), **Africa:** MED (Mediterranean), SAH (Sahara), WAF (Western Africa), CAF (Central Africa), NEAF (North Eastern Africa), SEAF (South Eastern Africa), WSAF (West Southern Africa), ESFA (East Southern Africa), MDG (Madagascar), **Asia:** RAR (Russian Arctic), WSB (West Siberia), ESB (East Siberia), RFE (Russian Far East), WCA (West Central Asia), ECA (East Central Asia), TIB (Tibetan Plateau), EAS (East Asia), ARP (Arabian Peninsula), SAS (South Asia), SEA (South East Asia), **Australia:** NAU (Northern Australia), CAU (Central Australia), EAU (Eastern Australia), SAU (Southern Australia), NZ (New Zealand), **Small Islands:** CAR (Caribbean), PAC (Pacific Small Islands)

Kuva SPM.3. Ilmaston ääri-ilmiöitten havaittuja alueellisia muutoksia ja muutosten yhteys ihmiskunnan aiheuttamaan ilmastomuutokseen.

Tarkastellut alueet on esitetty kartalle sijoitetuin kuusikulmioin, ja alueitten kirjainlyhenteet on selitetty kuvan alareunassa. Kuvat esittävät kunkin tarkastellun alueen käsittäviä muutoksia 1950-luvulta nykypäivään. Pienemmille osa-alueille tai lyhyemmille ajanjaksoille lasketut muutokset voivat poiketa kuvassa esitetyistä. Kuusikulmioitten värit kuvaavat muutoksen luonnetta. Raidalliset kuusikulmiot (valkoista ja vaaleanharmaata) tarkoittavat, että eri lähteistä peräisin olevat tiedot muutoksen suunnasta ovat ristiriitaisia. Harmaa kuusikulmio kertoo, että havaintotietoa ja/tai tutkimuskirjallisuutta on olemassa niin niukalti, että muutoksen arvioiminen ei ylipäänsä luonnistu. Kirkkaat värit taas osoittavat, että havaitun muutoksen suunta voidaan kertoa vähintäänkin kohtuullisen luotettavasti. Ihmisten tuottamien päästöjen merkitys muutoksen aiheuttajana on ilmaistu pisteiden lukumäärällä: kolme pistettä – vahva näyttö vaikutuksesta; kaksi pistettä – keskitasoinen näyttö; yksi piste – vähän näyttöä.

Kuvaosio (a): Kuumien ääri-ilmiöitten muutokset perustuvat ensisijaisesti päivittäisiin ylimpiin lämpötiloihin. Lisäksi on tarkasteltu mm. helleaaltojen kestoja, yleisyyttä ja voimakkuutta. Punaiset kuusikulmiot osoittavat alueita, joilla tietoa kuumien ääri-ilmiöitten lisääntymisestä voidaan pitää vähintäänkin kohtuullisen luotettavana.

Kuvaosio (b): Runsaitten sateitten esiintymistä on tutkittu sellaisten indeksien perusteella, jotka kertovat yhden tai viiden päivän aikana kertyneestä sademäärästä. Vihreät kuusikulmiot osoittavat alueita, joilla tietoa rankkasateitten lisääntymisestä voidaan pitää vähintäänkin kohtuullisen luotettavana.

Kuvaosio (c): Maataloutta ja luontoa haittaavan kuivuuden arvioiminen perustuu havaittuihin ja simuloituihin pinnanläheisen maakerroksen kosteuden kokonaismääriin. Näitä arvioita on täydennetty tutkimalla maan pinnan kosteutta, vesitasapainoa (sademäärän ja haihtumisen erotus) sekä sademääriä ja ilman kyllästysvajausta kuvaavia indeksejä. Keltaiset kuusikulmiot osoittavat alueita, joilla tietoa kuivuuden lisääntymisestä voidaan pitää vähintään kohtuullisen luotettavana. Vastaavasti vihreällä merkityillä alueella kuivuutta näyttäisi esiintyvän entistä vähemmän.

Havaittuja alueellisia muutoksia on tarkasteltu laajemmin teknillisen yhteenvedon taulukossa TS.5. Huomattakoon esimerkiksi, että Etelä-Amerikan eteläosa (SSA) on ainoa tarkasteltu alue, missä mitkään tässä kuvassa esitetyt mittarit eivät näytä muutoksia. Sielläkin keskilämpötila on kuitenkin noussut, pakkaset vähentyneet ja läheisillä merialueilla esiintyy korkeita lämpötiloja entistä useammin.

{ 11.9, atlas 1.3.3, atlas.2, taulukko TS.5, tekstilaatikko TS.10, kuva 1 }

kymmenen vuoden aikana on esiintynyt sellaisia kuumia ääri-ilmiöitä, jotka olisivat olleet erittäin epätodennäköisiä, elleivät ihmiskunnan toimet olisi vaikuttaneet ilmastojärjestelmään. Merillä korkeita pintalämpötiloja esiintyy suunnilleen kaksi kertaa niin usein kuin 1980-luvulla, ja tässäkin ihmisten toiminnalla on todennäköisesti ollut sormensa pelissä ainakin vuoden 2006 jälkeen.

{ Tekstilaatikko 9.2, 11.2, 11.3, 11.9, TS.2.4, TS.2.6, tekstilaatikko TS.10 } (kuva SPM.3)

A.3.2 Rankkasateet ovat yleistyneet ja voimistuneet 1950-luvulta lähtien suurimmalla osalla niistä maa-alueista, joilla havaintotiedot ovat riittävän kattavia muutosten laskemiseksi. Tässäkin ihmiskunnan aiheuttama ilmastomuutos on todennäköisesti ollut tärkein syy. Joillakin alueilla ilmastomuutos on lisännyt maatalouteen ja luontoon vaikuttavaa kuivuutta¹⁵, joka on aiheutunut veden haihtumisen (evapotranspiraatio) lisääntymisestä¹⁶.

{ 8.2, 8.3, 11.4, 11.6, 11.9, TS.2.6, tekstilaatikko TS.10 } (kuva SPM.3)

¹⁵Maatalouteen ja luontoon vaikuttava kuivuus tarkoittaa tässä tilannetta, jossa maaperässä on poikkeuksellisen niukalti kosteutta. Se voi johtua sademäärän vähäisyydestä, voimakkaasta haihtumisesta tai näistä molemmista. Kasvukauden aikana maan kuivuus haittaa kasvintuotantoa ja luonnon hyvinvointia. Meteorologinen kuivuus (alhainen sademäärä) ja hydrologinen kuivuus (vähäiset virtaamat vesistöissä) ovat osaksi eri ilmiöitä kuin maatalouden ja luonnon kokema kuivuus, ja niitten havaittuja muutoksia käsitellään tarkemmin pääraportin 11. luvussa.

¹⁶Evapotranspiraatio kertoo veden haihtumisen yhteenlasketun määrän vesi-, lumi ja jääpinnoilta, paljaalta maalta ja kasvillisuudesta.

A.3.3 Maailmanlaajuisen monsuunisademäärän¹⁷ väheneminen 1950-luvulta 1980-luvulle johtui osittain ihmisten tuottamista pienhiukkaspäästöistä pohjoisella pallonpuoliskolla. Sen jälkeen monsuunisateet ovat jälleen lisääntyneet kasvihuonekaasupitoisuuksien nousun ja ilmastojärjestelmän sisäisten vaihtelujen vaikutuksesta. Etelä- ja Itä-Aasiassa sekä Länsi-Afrikassa pienhiukkaspäästöjen aiheuttama jäähdytys on jarruttanut ilmaston lämpenemisen aiheuttamaa monsuunisateiden lisääntymistä. Länsi-Afrikan monsuunisateiden lisääntyminen 1980-luvulta lähtien johtuneen osittain kasvihuonekaasujen lisääntymisestä sekä aerosolipäästöjen jäähdyttävän vaikutuksen vähenemisestä Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa.

{2.3, 3.3, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6, tekstilaatikko 8.1, tekstilaatikko 8.2, 10.6, tekstilaatikko TS.13}

A.3.4 Voimakkaita, luokkiin 3–5 kuuluvia trooppisia hirmumyrskyjä on viimeksi kuluneitten neljän vuosikymmenen aikana ilmeisesti esiintynyt maailmanlaajuisesti entistä enemmän. Samalla se leveysaste, jolla läntisen Tyynen valtameren hirmumyrskyt saavuttavat suurimman voimansa, on siirtynyt pohjoisemmaksi. Näitä muutoksia ei voida selittää pelkästään ilmastojärjestelmän sisäisillä vaihteluilla. Sen sijaan trooppisten hirmumyrskyjen yhteenlaskettu lukumäärä ei välttämättä ole muuttunut. Fysiikan lainalaisuuksien perusteella on varsin ilmeistä, että ilmaston lämpiäminen voimistaa trooppisiin myrskyihin liittyviä sademääriä, mutta havaintotiedot eivät vielä ole riittäviä tällaisen trendin toteennäyttämiseksi.

{8.2, 11.7, tekstilaatikko TS.10}

A.3.5 Kasvihuonekaasupäästöt ovat todennäköisesti lisänneet sellaisten säätaphtumien esiintymisiä, joissa useampi säämuuttuja saa samanaikaisesti ääreviä arvoja¹⁸. Esimerkkejä tällaisista ovat samanaikaisesti esiintyvä lämpöaalto ja kuivuus, metsäpalovaaraa aiheuttava säätilanne ja monen tekijän yhteisvaikutuksena syntyvä tulva.

{11.6, 11.7, 11.8, 12.3, 12.4, TS.2.6, taulukko TS.5, tekstilaatikko TS.10}

A.4 Tasapainotilaa vastaavalle ilmaston herkkyyksiluvulle laskettu paras arvio on 3 °C. Edelliseen arviointiraporttiin verrattuna luvun epävarmuusväliä on saatu kavennettua. Näin siksi, että ilmastojärjestelmää ja voimistuvan säteilypakotteen aiheuttamia muutoksia ymmärretään nykyään entistä paremmin. Myös muinaisten aikojen ilmaston parempi tuntemus on auttanut tarkentamaan arviota.

{2.2, 7.3, 7.4, 7.5, tekstilaatikko 7.2, 9.4, 9.5, 9.6, yhdistävä tekstilaatikko 9.1}

A.4.1 Ihmisten toiminnasta aiheuttunut säteilypakote, suuruudeltaan 2,72 [1,96–3,48] Wm⁻² (vuoden 2019 arvo verrattuna vuoteen 1750), on lämmittänyt ilmastojärjestelmää. Lämpeneminen johtuu pääasiassa kasvihuonekaasujen kohonneista pitoisuuksista ilmakehässä, kun taas pienhiukkasten lisääntymisen aiheuttama jäähdytys on osaksi kumonnut tätä lämmittävää vaikutusta. Edelliseen arviointiraporttiin verrattuna säteilypakote on suurentunut 0,43 W m⁻² (19 %), josta 0,34 W m⁻² johtuu kasvihuonekaasujen pitoisuuksien noususta vuoden 2011 jälkeen. Loppuosa aiheutuu arviointimenetelmien kehittymisestä ja siitä, että pienhiukkasten pitoisuudet ilmakehässä ovat viime vuosina maailmanlaajuisesti pienentyneet.

{2.2, 7.3, TS.2.2, TS.3.1}

¹⁷Monsuuni-ilmastovyöhykkeeseen kuuluvat ne alueet, joilla kesän ja talven sademäärien ero on suurempi kuin 2,5 mm/vrk. “Maailmanlaajuinen monsuunisademäärä” tarkoittaa keskimääräistä sademäärää monsuuni-ilmastovyöhykkeeseen kuuluvilla maa-alueilla.

¹⁸Sään tai ilmaston ääritilanteitten yhdistelmä tarkoittaa tilannetta, jossa usempi ilmastomuuttuja saa samanaikaisesti niin ääreviä arvoja, että siitä koituu haittaa tai vaaraa yhteiskunnalle ja ympäristölle. Esimerkkejä tällaisesta ovat samaan aikaan lämpöaallon kanssa sattuva kuivuus, eri tekijöitten yhteisvaikutuksena syntyvät tulvat (esim. myrskyn aiheuttama meren pinnan kohoaminen korkealla samaan aikaan hyvin voimakkaan sateen ja/tai jokivirtaaman kanssa) ja maastopalojen vaaraa aiheuttava sää (kuuma, kuiva ja tuulinen ilma).

A.4.2 Päästöjen aiheuttama positiivinen nettosäteilypakote kerryttää ilmastojärjestelmään koko ajan lisää lämpöenergiaa. Lämpöenergian karttumista osaksi jarruttaa korkeammista lämpötiloista johtuva avaruuteen karkaavan lämpösäteilyn lisääntyminen. Ilmastojärjestelmän keskimääräinen havaittu lämpenemisnopeus kasvoi jakson 1971–2006 0,50 [0,32–0,69] W m⁻²:sta¹⁹ arvoon 0,79 [0,52–1,06] W m⁻² vuosina 2006–2018²⁰. Ilmastojärjestelmän kertyneestä lisälämmöstä 91 % päätyi meriin; maaperän lämpenemisen osuus oli noin 5 %, jään ja lumen vähenemisen 3 % ja ilmakehän lämpenemisen 1 %.

{7.2, tekstilaatikko 7.2, TS.3.1}

A.4.3 Lämpöenergian lisääntyminen on nostanut keskimääräistä maailmanlaajuista merenpinnan korkeutta. Merenpinnan nousu on valtaosin aiheutunut maa-alueitten jäätiköitten massakadosta ja meriveden lämpölaajenemisesta. Vuosina 1971–2018 lämpölaajeneminen selitti merenpinnan noususta 50 %, kun taas vuoristojäätiköiden sulamisen osuus oli 22 % ja suurten mannerjäätiköitten kutistumisen 20 %; maaperään ja manneralueitten vesistöihin varastoituneen veden määrän väheneminen vaikutti 8 % osuudella. Jaksojen 1992–1999 ja 2010–2019 välillä mannerjäätiköitten pienentyminen on nopeutunut nelinkertaiseksi. Vuosina 2006–2018 manner- ja vuoristojäätiköiden massakato oli jo tärkein merenpinnan nousua aiheuttava tekijä.

{9.4, 9.5, 9.6, yhdistävä tekstilaatikko 9.1}

A.4.4 Tasapainotilaa vastaava ilmaston herkkyysluku on keskeisen tärkeä suure, joka kertoo, kuinka paljon ilmasto lämpenee säteilypakotteen vaikutuksesta hyvin pitkällä aikavälillä. Erityyppisten tutkimusten perusteella²¹ on hyvin epätodennäköistä, että herkkyysluvun arvo olisi pienempi kuin 2 °C tai isompi kuin 5 °C. Tässä tuoreimmassa IPCC-raportissa parametrin todennäköisimpänä arvona pidetään 3 °C:ta ja epävarmuusväliksi annetaan on 2,5–4 °C. Edellisessä IPCC-raportissa epävarmuusväli oli 1,5–4,5 °C eikä todennäköisintä arviota annettu ensinkään.

{7.4, 7.5, TS.3.2}

B. Tulevaisuuden ilmaston ennusteita

IPCC-raportissa tarkastellaan viittä uutta kasvihuonekaasujen päästöskenaariota. Skenaariot kuvaavat entistä laajempaa joukkoa kasvihuonekaasujen, maankäytön ja ilman saasteiden vaihtoehtoisia kehityskulkuja. Näitä päästöskenaarioita käytetään lähtötietoina, kun simuloidaan ilmastojärjestelmän muutoksia mallien avulla. Ennusteissa otetaan huomioon myös auringon aktiivisuuden vaihteluitten ja tulivuorenpurkausten pitkän aikavälin keskimääräiset vaikutukset. Ellei toisin mainita, muutoksia esitetään erikseen lyhyelle (v. 2021–2040), keskipitkälle (v. 2041–2060) ja pitkälle aikavälille (v. 2081–2100) käyttäen vertailukohtana vuosien 1850–1900 simuloitua ilmastoa.

B.1 Kaikkien tarkasteltujen kasvihuonekaasuskenaarioitten mukaan maapallon keskilämpötila edelleen nousee, ainakin vuosisadan puoliväliin asti. Ilmastopesimusten mukaiset maailmanlaajuisen lämpenemisen 1,5 ja 2 asteen ylärajat ylittyvät tämän vuosisadan aikana, ellei hiili-dioksidin ja muiden kasvihuonekaasujen päästöjä onnistuta leikkaamaan tulevina vuosikymmeninä todella merkittävästi.

{2.3, yhdistävä tekstilaatikko 2.3, yhdistävä tekstilaatikko 2.4, 4.3, 4.4, 4.5} (kuvat SPM.1, SPM.4 ja SPM.8; taulukko SPM.1, tekstilaatikko SPM.1)

¹⁹ Kumulatiivinen lämpöenergian lisäys vuosina 1971–2006 oli 282 [177–387] ZJ (1 ZJ = 10²¹ joulea).

²⁰ Kumulatiivinen energian lisäys v. 2006–2018 oli 152 [100–205] ZJ.

²¹ Ilmastojärjestelmän toiminnan ymmärtäminen, mittaushavainnot, muinaisen ilmaston tutkiminen ja ilmastomallien tulokset.

Tekstilaatikko SPM.1: Skenaariot, ilmastomallit ja tulevaisuuden ilmaston ennustaminen

Laatikkoteksti SPM.1.1: Tässä raportissa arvioidaan tulevaa ilmastoa viiden kasvihuonekaasuskenaarion pohjalta, joissa tarkasteltava ajanjakso alkaa vuodesta 2015. Eri skenaariot kuvaavat varsin erilaista päästöjen tulevaa kehitystä. Mukana on skenaarioita^w, joissa kasvihuonekaasupäästöt ovat hyvin suuria, niin että yhteenlasketut maailmanlaajuiset CO₂-päästöt suunnilleen kaksinkertaistuvat nykyisestä vuoteen 2100 (SSP3-7.0-skenaario) tai jopa jo v. 2050 mennessä (SSP5-8.5). Keskivaihtoehdon eli SSP2-4.5-skenaarion mukaan hiilidioksidipäästöt pysyvät suunnilleen nykyisellä tasolla vuosisadan puoliväliin asti ja kääntyvät sen jälkeen laskuun. Alhaisten kasvihuonekaasupäästöjen SSP1-1.9- ja SSP1-2.6-skenaarioissa hiilidioksidin nettopäästöt putoavat nolleen vuoden 2050 tienoilla tai sen jälkeen, minkä jälkeen päästöjen oletetaan olevan negatiivisia^w. Eri skenaarioita vastaavat päästöjen aikasarjat on esitetty kuvassa SPM.4. Päästöjen kehitys kussakin skenaariossa riippuu väestönkasvusta, yhteiskuntien ja talouden kehittymisestä, ilmastomuutoksen hillintätoimista ja ilman saastumisen torjunnasta. Samansuuruisiin päästöihin voidaan päätyä useamman erilaisen kehityskulun seurauksena. Tässä raportissa ei ole pyritty arvioimaan minkään yksittäisen kasvihuonekaasuskenaarion toteutumisen todennäköisyyttä tai ovatko kaikki skenaariot edes ylipäänsä mahdollisia.

{ 1.6, yhdistävä tekstilaatikko 1.4, TS.1.3 } (kuva SPM.4)

Laatikkoteksti SPM.1.2: Raportin ilmastomuutosarvioitten pohjana on käytetty ilmastomalleja, jotka olivat mukana Maailman ilmastontutkimusohjelman “Coupled Model Intercomparison Project” -hankkeen 6. vaiheessa (CMIP6-mallit). Aiempiin mallisukupolviin verrattuna näissä malleissa on kehitetty ilmastojärjestelmän fysiikaalisien, kemiallisten ja biologisten ilmiöitten kuvaamista ja laskentatarkkuutta on lisätty. Tämä on parantanut mallien kykyä simuloida havaittua ilmastoa. Edelleenkin mallien tulokset kyllä poikkeavat jossakin määrin havaitusta ilmastosta — esimerkiksi sademäärien alueellisissa jakaumissa on eroja. Kun tarkastellaan mallitulosten keskiarvoa, maapallon keskilämpötilan tähänastiset simuloidut vaihtelut ovat enimmänsä aikaa poikenneet havaitusta vähemmän kuin 0,2 °C. Joissakin malleissa simuloitu lämpeneminen kuitenkin menee havainnoista lasketun epävarmuushaarukan ulkopuolelle.

{ 1.5, yhdistävä tekstilaatikko 2.2, 3.3, 3.8, TS.1.2, yhdistävä tekstilaatikko TS.1 } (kuvat SPM.1b ja SPM.2)

Laatikkoteksti SPM.1.3: CMIP6-malleissa ilmaston herkkyytluku vaihtelee laajemmissa rajoissa kuin edellisen sukupolven CMIP5-malleissa. Lisäksi CMIP6-malleissa herkkyytluku on keskimäärin suurempi. Herkkyytluvun suurentuminen aiheutuu pilvisyyteen liittyvän palauteilmiön vahvistumisesta. Se on CMIP6-malleissa noin 20 % voimakkaampi kuin edellisen sukupolven malleissa.

{ Tekstilaatikko 7.1, 7.3, 7.4, 7.5, TS.3.2 }

Laatikkoteksti SPM.1.4: Aikaisemmista IPCC:n raporteista poiketen maapallon pintalämpötilan, merien lämpenemisen ja merenpinnan korkeuden muutosennusteet on laadittu käyttämällä pohjana suuren mallijoukon tuottamien ennusteitten ohella havaintoihin perustuvia reunaehtoja. Muille ilmastosuureille ei vielä ole olemassa käyttökelpoisia menetelmiä tällaisten tarkennettujen muutosennusteitten laatimiseksi. Joka tapauksessa tietyllä valitulla ilmaston lämpenemisen tasolla monien ilmastosuureitten muutosten maantieteelliset jakaumat ovat varsin samankaltaisia riippumatta siitä, minkä skenaarion tuloksena ja milloin tämä lämpenemisen taso saavutetaan.

{ 1.6, 4.3, 4.6, tekstilaatikko 4.1, 7.5, 9.2, 9.6; yhdistävä tekstilaatikkot 11.1 ja TS.1 }

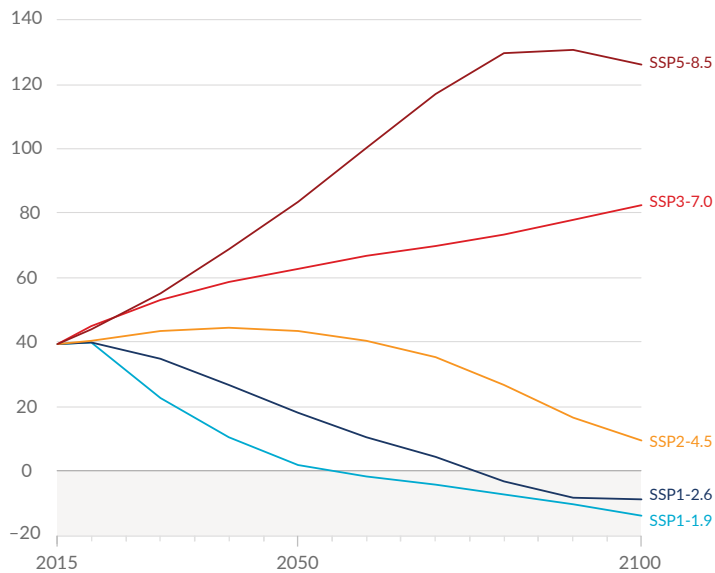
^wTarkastelluille kasvihuonekaasuskenaarioille käytetään lyhennysmerkintää SSPx-y, missä “SSP” tulee sanoista “Shared Socio-economic Pathway” (yhteiskunnallis-taloudellinen kehityskulku) ja “x” viittaa siihen, minkätyyppinen yhteiskunnallinen kehityskulku on kyseessä. Symboli “y” taas kertoo, kuinka suuri kyseistä skenaariota vastaava säteilypakote (watteina neliometriä kohden eli W m⁻²) likimäärin on vuonna 2100. Yksityiskohtaista vertailua aiemmissa IPCC-raporteissa käytettyjen kasvihuonekaasuskenaarioitten kanssa on esitetty kappaleissa TS.1.3, 1.6 ja 4.6. Vakiomuotoisen SSPx-y-merkinnän avulla varmistetaan, että eri tutkimuksissa esitetyt muutosarviot ovat vertailukelpoisia. Tässä osaraportissa ei oteta kantaa eri SSP-skenaarioitten pohjana käytettyihin yhteiskunnan kehitykseen liittyviin olettamuksiin. SSP-skenaariot eivät kata kaikkia mahdollisia tulevaisuuden kehitysvaihtoehtoja, joten uusia skenaarioita on mahdollista yhä tarvittaessa kehittää.

^wNegatiivisilla hiilidioksidin nettopäästöillä tarkoitetaan tilannetta, jossa ihmisten toimintaan liittyvät hiilidioksidin nielut ovat maailmanlaajuisesti suurempia kuin päästöt.

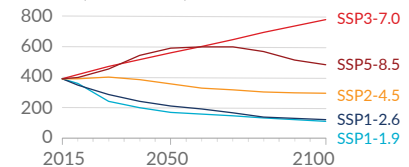
Kasvihuonekaasujen päästöt lämmittävät ilmastoa tulevaisuudessa yhä lisää. Ylivertaisesti eniten lämpenemistä aiheuttavat hiilidioksidipäästöt.

(a) Tulevat hiilidioksidipäästöt (GtCO₂/vuodessa, kuva vasemmalla) ja kolmen muun ilmastomuutokseen vaikuttavan kaasun päästöt (pienemmät kuvat oikealla) viiden SSP-skenaarion mukaan

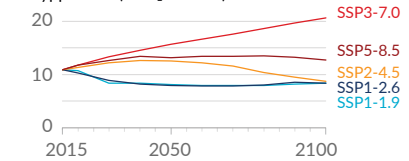
Hiilidioksidi (GtCO₂/vuosi)



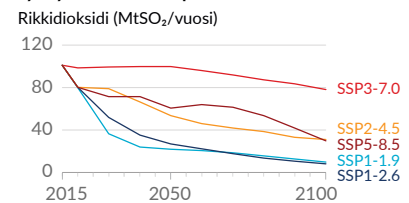
Kahden merkittävän kasvihuonekaasun päästöt
Metaani (MtCH₄/vuosi)



Dityppioksidi (MtN₂O/vuosi)



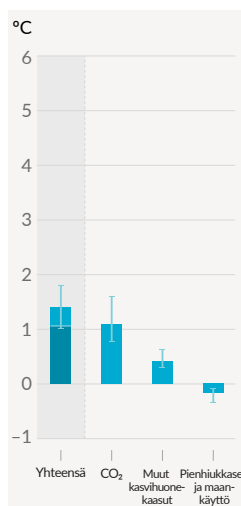
Yhden ilmansaasteita ja pienhiukkasia synnyttävän kaasun päästöt
Rikkidioksidi (MtSO₂/vuosi)



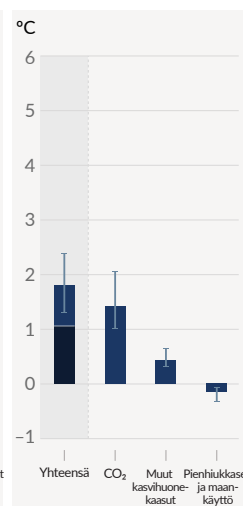
b) Eri tekijöitten vaikutus maapallon keskilämpötilaan – suurin merkitys on hiilidioksidipäästöillä (CO₂)

Maapallon keskilämpötilan muutos vuosina 2081–2100 verrattuna jaksoon 1850–1900 (°C)

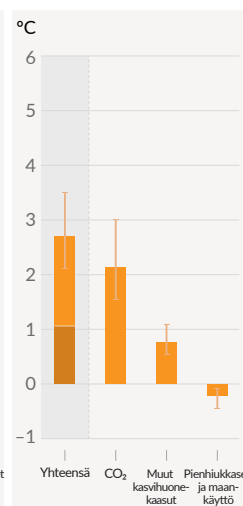
SSP1-1.9



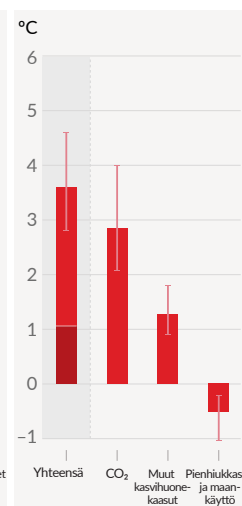
SSP1-2.6



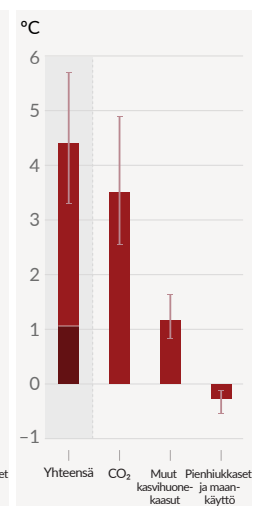
SSP2-4.5



SSP3-7.0



SSP5-8.5



Kaikkien tekijöitten yhdessä aiheuttama lämpeneminen (tähän mennessä havaittu lämpeneminen merkitty tummemmalla värillä) sekä erikseen hiilidioksidin ja muiden kasvihuonekaasujen yhdessä aiheuttama lämpeneminen sekä pienhiukkasten ja maankäytön muutosten aiheuttama jäähdyttävä vaikutus.

Kuva SPM.4. Neljän ilmastomuutoksen kannalta keskeisen kaasun tulevat päästöt ja eri tekijöitten ilmastoa lämmittävä/jäähdyttävä vaikutus viiden kasvihuonekaasuskenaarion (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 ja SSP5-8.5) mukaan.

Kuvaosio (a): Eräitten kaasujen ihmisten tuottamat vuotuiset päästöt v. 2015–2100: hiilidioksidi (CO_2 , yksikkö GtCO_2/v , vasen kaavio); metaani (CH_4 , MtCH_4/v , oikealla ylhäällä); dityppioksidi (N_2O , $\text{MtN}_2\text{O}/\text{v}$, keskellä oikealla); rikkidioksidi (SO_2 , MtSO_2/v , alhaalla oikealla). CO_2 , CH_4 ja N_2O ovat kolme keskeisintä kasvihuonekaasua, kun taas SO_2 on tärkeä ilmakehän pienhiukkasten alkulähde.

Kuvaosio (b): Maapallon keskilämpötilan ennustettu muutos ($^{\circ}\text{C}$) vuosina 2081–2100 verrattuna jakson 1850–1900 tilanteeseen (kunkin kaavion vasemmanpuoleiset pylväät) sekä erikseen pelkästään hiilidioksidin aiheuttama lämpeneminen (pylväs 2), kaikkien muitten kasvihuonekaasujen yhdessä aiheuttama lämpötilan nousu (pylväs 3) ja pienhiukkasten, maankäytön muutosten ja lentokoneitten tiivistymisjuovien aiheuttama lämpötilan muutos (pylväs 4); kaikki erikseen viidelle SSP-kasvihuonekaasuskenaariolle.

Pylväät kuvaavat muutoksen mediaaniarvoa ja pystyjanat epävarmuusväliä. Havaittu lämpeneminen vuosina 2010–2019 suhteessa jaksoon 1850–1900 (katso kuvan SPM.2 a-osiota) on merkitty vasemmanpuoleisten pylväitten alaosaan tummennettuna. Vasemmanpuoleisten pylväitten esittämä kokonaislämpeneminen lasketaan taulukossa SPM.1 kuvatulla tavalla. Muiden pylväitten esittämät muutokset on tuotettu emulaattorimallin avulla.

{Yhdistävä tekstilaatikko 1.4; 4.6; kuva 4.35; 6.7; kuvat 6.18, 6.22 ja 6.24; 7.3; yhdistävä tekstilaatikko 7.1; kuva 7.7; tekstilaatikko TS.7; kuvat TS.4 ja TS.15}

B.1.1 Jopa erittäin alhaisten kasvihuonekaasupäästöjen SSP1-1.9-skenaarion mukaan maapallon keskimääräinen pintalämpötila on v. 2081–2100 1,0–1,8 $^{\circ}\text{C}$ korkeampi kuin v. 1850–1900. Jos päästöt ovat suurempia, lämpenemistä olisi odotettavissa 2,1–3,5 $^{\circ}\text{C}$ (SSP2-4.5) tai 3,3–5,7 $^{\circ}\text{C}$ (SSP5-8.5).²⁴ Edellisen kerran maapallon ilmasto oli vähintään 2,5 $^{\circ}\text{C}$ lämpimämpi kuin v. 1850–1900 yli kolme miljoonaa vuotta sitten.

{2.3, yhdistävä tekstilaatikko 2.4, 4.3, 4.5, tekstilaatikko TS.2, tekstilaatikko TS.4, yhdistävä tekstilaatikko TS.1} (taulukko SPM.1)

B.1.2 Korkeiden ja erittäin korkeiden kasvihuonekaasupäästöjen skenaarioissa (SSP3-7.0 ja SSP5-8.5) ilmasto lämpenee tällä vuosisadalla vääjäämättä enemmän kuin 2 astetta verrattuna vuosien 1850–1900 tasoon. Erittäin suurella todennäköisyydellä tuo raja ylittyy myös keskitasoisissa SSP2-4.5-

²⁴ Ellei toisin ole mainittu, maapallon keskilämpötilan muutokset ilmaistaan 20 vuoden liukuvina keskiarvoina.

Taulukko SPM.1. Viittä SSP-skenaariota vastaava maapallon keskimääräisen pintalämpötilan muutos ($^{\circ}\text{C}$) kolmelle 20 vuoden mittaiselle tulevaisuuden ajanjaksolle. Muutokset on ilmaistu suhteessa jakson 1850–1900 lämpötilaan. Muutoksia laskettaessa on otettu huomioon mallitulosten ohella myös mm. havaintoihin pohjautuvaa tietoa. Siinä yhteydessä arviota havaitusta lämpenemisestä ennen ajanjaksoa 1986–2005 on tarkennettu, ja tämän raportin mukaan tuo lämpötilan muutos on 0,08 [−0,01 – +0,12] $^{\circ}\text{C}$ korkeampi kuin edellisessä arviointiraportissa sanottiin (ks. alaviitettä 10). Muutokset tuoreeseen vertailujaksoon (1995–2014) nähden voidaan likimäärin laskea vähentämällä taulukon lukuarvoista 0,85 $^{\circ}\text{C}$ (parhaan arvion mukainen havaittu lämpeneminen jaksojen 1850–1900 ja 1995–2014 välillä). Kaikille muutoksille on annettu sekä todennäköisin arvio ΔT että epävarmuusväli.

{Yhdistävä tekstilaatikko 2.3, 4.3, 4.4, yhdistävä tekstilaatikko TS.1}

Jakso Skenaario	2021–2040		2041–2060		2081–2100	
	ΔT	Epävarmuusväli	ΔT	Epävarmuusväli	ΔT	Epävarmuusväli
SSP1-1.9	1.5	1.2–1.7	1.6	1.2–2.0	1.4	1.0–1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2–1.8	1.7	1.3–2.2	1.8	1.3–2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2–1.8	2.0	1.6–2.5	2.7	2.1–3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2–1.8	2.1	1.7–2.6	3.6	2.8–4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3–1.9	2.4	1.9–3.0	4.4	3.3–5.7

skenaariossa. Hyvin alhaisten kasvihuonekaasupäästöjen SSP1-1,9-skenaariossa rajan ylittyminen on erittäin epätodennäköistä ja kohtuullisen alhaisten päästöjen SSP1-2,6-skenaariossa siinäkin melko epätodennäköistä.²⁵ SSP5-8.5-skenaarion mukaan kahden asteen lämpenemisraja ylittyyne jo keskipitkällä aikavälillä (ajanjakso 2041–2060).²⁶

{4.3, yhdistävä tekstilaatikko TS.1} (taulukko SPM.1, kuva SPM.4, tekstilaatikko SPM.1)

B.1.3 Keskitason, korkeiden ja erittäin korkeiden kasvihuonekaasupäästöjen skenaarioissa (SSP2-4.5, SSP3-7.0 ja SSP5-8.5) ilmasto lämpenee (verrattuna jaksoon 1850–1900) tämän vuosisadan aikana aivan varmasti enemmän kuin 1,5 °C (tiukempi tavoiteraja).²⁷ SSP1-1.9-skenaarion toteutuessa lämpeneminen saattaa mahdollisen tilapäisen ylityksen jälkeen hiipua ennen vuosisadan loppua takaisin 1,5 asteen rajan alapuolelle.

{4.3, yhdistävä tekstilaatikko TS.1} (taulukko SPM.1, kuva SPM.4)

B.1.4 Luonnollisen vaihtelun vaikutuksesta maapallon keskilämpötila voi ajan kuluessa vaihdella pitkän aikavälin trendin ylä- tai alapuolella.²⁸ Vaikka maapallon keskilämpötilan muutos ylittäisikin jonakin yksittäisenä vuotena tietyn tason, esimerkiksi 1,5 °C tai 2 °C verrattuna jaksoon 1850–1900, ei se silti tarkoita, että kyseinen ilmaston lämpenemisen taso olisi vielä saavutettu.²⁹

{Yhdistävä tekstilaatikko 2.3, 4.3, 4.4, tekstilaatikko 4.1, yhdistävä tekstilaatikko TS.1} (taulukko SPM. 1, kuvat SPM.1 ja SPM.8)

B.2 Lämpenemisen jatkuessa ilmastojärjestelmässä ilmenevät moninaiset muutokset aina vaan voimistuvat. Tällaisia muutoksia ovat mm. kuumien sään ääri-ilmiöitten yleistyminen ja voimistuminen, korkeat lämpötilat merissä, runsaat sateet, joillakin alueilla esiintyvät kuivat jaksot sekä voimakkaiden trooppisten hirmumyrskyjen osuuden kasvu. Lumipeite, ikirouta ja pohjoisten merien jäät vähenevät.

{4.3, 4.5, 4.6, 7.4, 8.2, 8.4, tekstilaatikko 8.2, 9.3, 9.5, tekstilaatikko 9.2, 11.1, 11.2, 11.3, 11.4, 11.6, 11.7, 11.9, yhdistävä tekstilaatikko 12.1, atlas.4, atlas.5, atlas.6, atlas.7, atlas.8, atlas.9, atlas.10, atlas.11} (kuvat SPM.5, SPM.6 ja SPM.8)

B.2.1 On lähes varmaa, että tulevaisuudessa nopeimmin lämpenevät mantereet; todennäköisesti 1,4–1,7 kertaa niin paljon kuin merialueet. Samalla pohjoiset napa-alueet lämpenevät edelleen enemmän kuin maapallo keskimäärin — suurella varmuudella yli kaksinkertaisella nopeudella.

{2.3, 4.3, 4.5, 4.6, 7.4, 11.1, 11.3, 11.9, 12.4, 12.5, yhdistävä tekstilaatikko 12.1, atlas.4, atlas.5, atlas.6, atlas.7, atlas.8, atlas.9, atlas.10, atlas.11, yhdistävä tekstilaatikko TS.1, TS.2.6} (kuva SPM.5)

B.2.2 Ilmaston lämmitessä myös ääri-ilmiöitten muutokset yhä edelleen voimistuvat. Esimerkiksi jokainen puolen asteen lisä nousu maapallon keskilämpötilassa lisää selvästi kuumuuteen liittyviä ääri-ilmiöitä, kuten helleaaltoja ja runsaita sademääriä sekä joillakin alueilla maaperän kuivuusjakso-

²⁵ SSP1-1.9- ja SSP1-2.6-skenaarioissa kasvihuonekaasupäästöt ovat varsin alhaisia, ja hiilidioksidin nettopäästöt putoavat nollaan vuoden 2050 tienoilla tai sen jälkeen. Tämän jälkeen päästöt ovat negatiivisia.

²⁶ Ylitys määritellään tässä siten, että maapallon keskilämpötilan muutos ylittää asetetun tason (esim. 2 °C) 20 vuoden keskiarvona.

²⁷ Tässä raportissa on käytetty entistä tarkempia menetelmiä sen arvioimiseksi, milloin tietty ilmaston lämpenemisen taso saavutetaan ensimmäisen kerran. Uudet arviot eivät siis ole suoraan verrattavissa aikaisempiin vastaaviin arvioihin.

²⁸ Luonnollinen vaihtelu tarkoittaa tässä sellaisia ilmaston heilahteluja, jotka tapahtuvat ilman ihmisten vaikutusta, eli yhtäältä ilmastojärjestelmän sisäistä vaihtelua ja toisaalta luonnollisten pakotetekijöitten aiheuttamaa vaihtelua. Luonnollisia pakotetekijöitä ovat mm. tulivuorenpurkaukset, auringon aktiivisuuden muutokset ja pidemmällä aikavälillä maapallon kiertoradan muutokset ja mannerliikunnot.

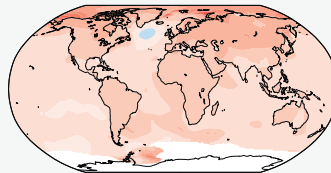
²⁹ Sisäisen vaihtelun arvioidaan heilahtelevan maailmanlaajuisia keskilämpötiloja yksittäisinä vuosina noin $\pm 0,25$ asteella.

Ilmastomuutoksen edetessä keskilämpötilojen, sademäärien ja maaperän kosteuden alueelliset muutokset voimistuvat

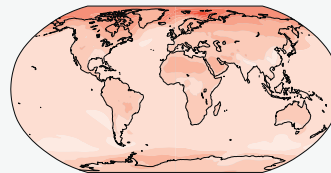
(a) Vuotuisen keskilämpötilan muutos (°C) maapallon ilmastolämmetessä yhdellä asteella

Yhden asteen nousu maapallon keskilämpötilassa näkyy kaikkialla maailmassa, ja lämpeneminen on yleensä suurempaa maalla kuin merialueilla, näin sekä havaintojen että mallitulosien mukaan. Useimmilla alueilla havaitut ja mallien tuottamat muutokset ovat samankaltaisia.

Havaittu muutos maapallon keskilämpötilan noustessa asteella



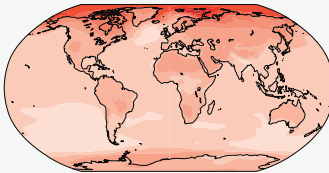
Simuloitu muutos maapallon keskilämpötilan noustessa asteella



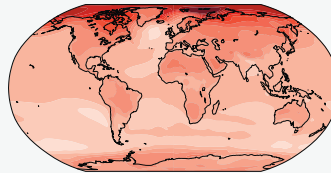
(b) Vuotuisen keskilämpötilan muutos (°C), vertailukohtana jakso 1850–1900

Ilmastomuutoksen voimakkuudesta riippumatta maa-alueet lämpenevät enemmän kuin merialueet ja napaseudut enemmän kuin trooppiset alueet.

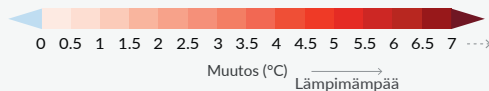
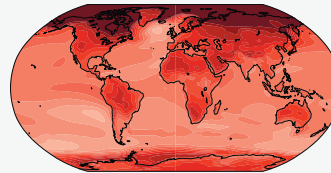
Simuloitu muutos maapallon lämmetessä 1.5°C



Simuloitu muutos maapallon lämmetessä 2°C



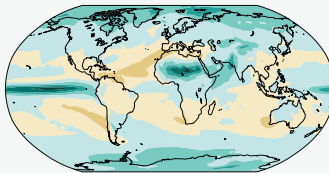
Simuloitu muutos maapallon lämmetessä 4°C



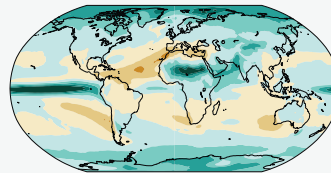
(c) Vuoden keskimääräisen sademäärän muutos (%), vertailukohtana jakso 1850–1900

Sademäärien ennustetaan lisääntyvän korkeilla leveysasteilla, Tyynellä valtamerellä päiväntasaajan läheisyydessä ja osissa monsuunialueita, mutta vähenevän osissa subtrooppista vyöhykettä ja paikoin trooppisilla alueilla.

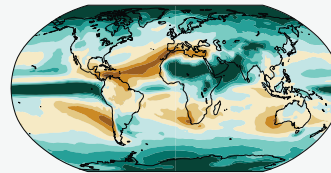
Simuloitu muutos maapallon lämmetessä 1.5°C



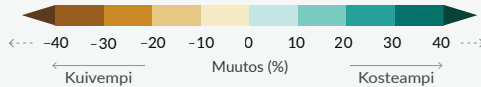
Simuloitu muutos maapallon lämmetessä 2°C



Simuloitu muutos maapallon lämmetessä 4°C



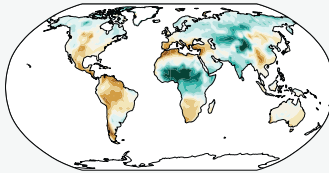
Kuivan ilmaston alueilla pienehkökin absoluuttiset muutokset voivat näkyä suurina prosentuaalisina sademäärän muutoksina.



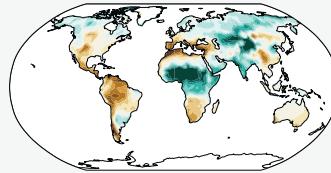
(d) Maaperän kosteuden vuotuisen keskiarvon muutos (keskihajontayksiköinä)

Lämpenemisen voimakkuudesta riippumatta maaperän kosteuden muutokset seuraavat ensisijaisesti sademäärän muutoksia, mutta myös haihtumisen muutokset vaikuttavat jonkun verran.

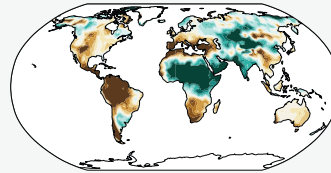
Simuloitu muutos maapallon lämmetessä 1.5°C



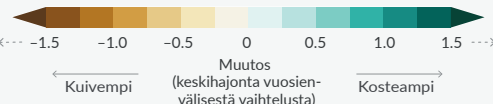
Simuloitu muutos maapallon lämmetessä 2°C



Simuloitu muutos maapallon lämmetessä 4°C



Kuivilla alueilla, joilla vuosienvälistä vaihtelua on vähän, pienehkökin absoluuttiset muutokset voivat näyttää suurilta, kun ne ilmaistaan keskihajontayksiköissä.



Kuva SPM.5. Vuoden keskilämpötilan, sademäärän ja maaperän kosteuden ennustettuja muutoksia.

Kuvaosio (a): Keskimääräisen vuotuisen pintalämpötilan muutos havaintojen ja mallisimulaatioitten perusteella. Vasemmanpuoleinen kartta näyttää vuoden keskilämpötilan havaitut muutokset ajanjaksolla 1850–2020 yhden asteen suuruista maapallon keskilämpötilan nousua kohden. Tulos on saatu muodostamalla lineaarinen regressioyhtälö, jossa paikallisia havaittuja keskilämpötilan muutoksia v. 1850–2020 selitetään maapallon keskilämpötilan muutosten avulla. Regressioyhtälöä laskettaessa otettiin kussakin hilapisteestä mukaan kaikki ne vuodet, joilta tietoja oli saatavilla. Näin saadaan pienennettyä ilmastonsäisen vaihtelun vaikutusta. Kartan valkoisilla alueilla havaintotietoa oli tarjolla alle sadan vuoden ajalta, ja näin lyhyestä aikasarjasta regressioyhtälöä ei välttämättä pystytä laskemaan luotettavasti. Oikeanpuoleinen kartta perustuu mallien tuloksiin ja näyttää vastaavalla tavalla simuloitujen vuoden keskilämpötilojen muutoksen, kun maapallo on lämmennyt yhden asteen suhteessa jaksoon 1850–1900.

Loput kuvaosiot: Simuloidut vuotuiset (b) keskilämpötilan (°C), (c) sademäärän (%) ja (d) maaperän kosteuden (vuosienvälisen vaihtelun keskihajontoina) muutokset maapallon ilmastonslämmetessä 1,5 °C, 2 °C tai 4 °C verrattuna jaksoon 1850–1900. Muutokset on laskettu ottamalla keskiarvo suuresta joukosta CMIP6-ilmastonsmuutosmalleilla tehtyjä malliajoja. Maaperän kosteuden muutos kuitenkin kuvaa mallituloslsten mediaania. Menetelmä on siis vastaava kuin mitä käytettiin kuvaosion (a) oikeanpuoleista karttaa muodostettaessa.

Kuvaosiossa (c) kuivilla alueilla esiintyvät suuretkin positiiviset prosentuaaliset muutokset voivat olla absoluuttisessa mielessä melko pieniä. **Kuvaosiossa (d)** yksikkönä on käytetty maaperän kosteuden vuotuisen vaihtelun keskihajontaa vuosina 1850–1900; keskihajonta on kuivuuden ankaruutta kuvattaessa yleisesti käytetty mittari. Esimerkiksi maaperän keskimääräisen kosteuden aleneminen yhden keskihajontan verran vastaa niin kuivia olosuhteita maaperässä, että sellaisia esiintyi vuosina 1850–1900 vain noin kerran kuudessa vuodessa. Kuivilla alueilla veden määrä maaperässä vaihtelee vuodesta toiseen vain vähän, ja siellä keskihajontayksikköinä ilmaistuina suurelta näyttävät muutokset voivat olla absoluuttisessa mielessä melko pieniä. Karttoja piirrettäessä on otettu keskiarvo kaikista niistä mallikokeista, joissa maapallo on jollakin aikavälillä lämmennyt vähintään 1,5, 2 tai 4 °C. Tarkasteluun on otettu mukaan kaikkia viittä kasvihuonekaasuskenaariosta (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 ja SSP5-8.5) vastaavia malliajoja. Maapallon kolmen asteen lämpenemistä vastaavat keskilämpötilan ja sademäärien muutoskartat on esitetty pääraportin luvun 4.6 kuvissa 4.31 ja 4.32. **Kuvaosioita (b), (c) ja (d)** vastaavat kartat, joissa on mukana myös tieto mallituloslsten yksimielisyyden asteesta, löytyvät kuvista 4.31, 4.32 ja 11.19.

{ Kuva 1.14, 4.6.1, yhdistävä tekstilaatikko 11.1, TS.1.3.2, kuvat TS.3 ja TS.5 }

ja³⁰. Paikoin on odotettavissa muutoksia myös meteorologisen kuivuuden ankaruudessa ja esiintymistiheydessä, yleisemmin kuivuuden lisääntymistä kuin vähentymistä. Hydrologista kuivuuttakin koetaan moniaalla enemmän. Myös sellaisia äärimmäisiä sääilmiöitä, joita ei ole koskaan aikaisemmin koettu, alkaa esiintymään yhä enemmän; näin käy, vaikka maailmanlaajuinen lämpiäminen saataisiin rajattua 1,5 asteeseen. Mitä harvinaisemmasta ilmiöstä on kyse, sitä suurempia ovat sen esiintymisen yleisyyden prosentuaaliset muutokset.

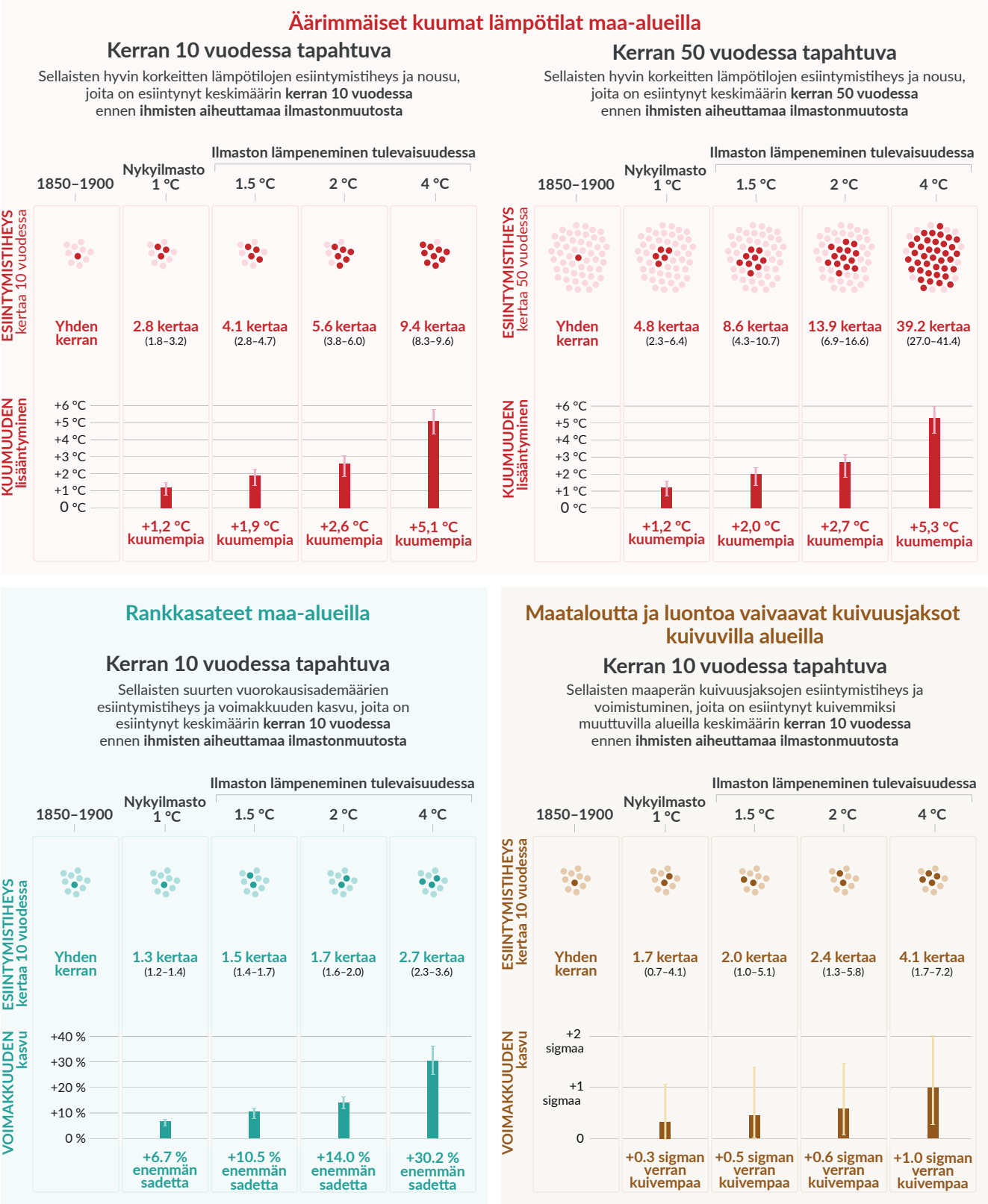
{ 8.2, 11.2, 11.3, 11.4, 11.6, 11.9, yhdistävä tekstilaatikko 11.1, yhdistävä tekstilaatikko 12.1, TS.2.6 } (kuva SPM.5, kuva SPM.6)

B.2.3 Osassa keskileveysasteitten ja puolikuivan ilmastons alueita sekä Etelä-Amerikan monsuunivyöhykkeellä lämpötilojen ennustetaan nousevan suhteessa eniten kaikkein kuumimpina päivinä, noin 1,5–2-kertaa niin paljon kuin maapallon keskilämpötila kohoaa. Pohjoisilla napaseuduilla taas eniten lämpenevät kaikkein kylmimmät päivät, noin kolme kertaa sen verran kuin maapallo keskimäärin lämpiää. Nykyisen mittapuun mukaan erittäin korkeita lämpötiloja esiintyy entistä useammin myös merissä, erityisesti tropiikissa ja napaseuduilla.

{ Tekstilaatikko 9.2, 11.1, 11.3, 11.9, yhdistävä tekstilaatikko 11.1, yhdistävä tekstilaatikko 12.1,

³⁰Maatalouteen ja luontoon vaikuttavan kuivuuden ennakoituja muutoksia arvioidaan ensisijaisesti tutkimalla pinnanläheisen maakerroksen kosteussisältöä. Aiheesta on kerrottu lisää alaviitteessä numero 15.

Ilmaston lämpenemisen edetessä sään ja ilmaston ääri-ilmiöt voimistuvat ja yleistyvät



Kuva SPM.6. Kuumien ääriämpötilojen (maa-alueilla), rankkasateitten (maa-alueilla) ja maaperän kuivuusjaksojen (kuivemmiksi muuttuvilla maa-alueilla) ennustettu voimistuminen ja yleistyminen.

Ennustetut muutokset on esitetty sellaisille ajankohdille, joina maapallon keskilämpötila on noussut 1 °C, 1,5 °C, 2 °C tai 4 °C verrattuna vuosien 1850–1900 ilmastoon. Kuvista käy ilmi sellaisten ääri-ilmiöitten esiintymistiheys ja voimakkuuden muutos, joita esiintyi tuonaikaisessa ilmastossa (eli käytännössä ennen ihmisten päästöjen vaikutusta) kerran 10 tai 50 vuodessa.

Äärimmäisen kuumiksi on luokiteltu sellaiset päivät, joina vuorokauden ylin lämpötila on ylittänyt tason, joka vertailujakson 1850–1900 aikana koettiin keskimäärin kerran kymmenessä (10 vuoden tapahtuma) tai kerran 50 vuodessa (50 vuoden tapahtuma). Vastaavasti **äärimmäisen suureksi** on katsottu sellainen päivittäinen sademäärä, jollaisia on saatu vertailujaksolla keskimäärin kerran kymmenessä vuodessa. Maaperä taas on tulkittu **äärimmäisen kuivaksi**, jos maakerroksen kokonaiskosteuden vuotuinen keskiarvo on ollut pienempi kuin vertailujakson 10. prosenttipistearvo. Ääritilanteita on tutkittu erikseen jokaisessa mallin hilapisteessä. Äärimmäisen kuumista lämpötiloista ja suurista sademääristä tulokset näytetään maailmanlaajuisesti, kuitenkin huomioiden pelkästään maa-alueet. Maaperän kuivuutta sen sijaan tarkastellaan ainoastaan kuivemmiksi muuttuvilla alueilla eli siellä, missä kuivuusjaksojen ennustetaan mallitulosten perusteella lisääntyvän verrattuna vuosien 1850–1900 ilmastoon. Näitä alueita ovat Pohjois-Amerikan länsi- ja keskiosat, Keski-Amerikka, suuri osa Etelä-Amerikkaa, Länsi- ja Keski-Eurooppa, Välimeren alue, Afrikan eteläosat, Madagaskar sekä Australian itä- ja eteläosat. Muualla maailmassa kuivuusongelmat eivät yleensä kovin paljoa helpotu tai vaikeudu. Maaperän kuivuutta koskevat ennusteet poikkeavat joillakin alueilla edellisen arviointiraportin tuloksista, mm. osissa Afrikkaa ja Aasiaa. Meteorologisen ja hydrologisen kuivuuden tulevia muutoksia on tarkasteltu pääraportin luvussa 11.

Kuvien **esiintymistiheyttä kuvaavassa osioissa** jokainen ennustusjakson vuosi (10 tai 50 vuotta) on esitetty pisteinä. Tummat pisteet ilmaisevat niitten vuosien lukumäärää, joina kyseinen ääri-ilmiö keskimäärin esiintyy, kun taas vaaleilla pisteillä merkittyinä vuosina kynnys ei ylity. Lukuarvot kuvaavat mediaaneja (väreillä) ja niiden epävarmuusvälejä (mustalla). Tummennettujen pisteiden lukumäärä esittää mediaania pyöristettynä lähimpään kokonaislukuun. **Ilmiön voimistumista kuvaavissa osioissa** muutoksen mediaanit ja niiden epävarmuusvälit esitetään pylväinä. Lämpötilan muutokset on ilmaistu asteina ja sademäärän muutokset prosentteina. Maaperän kuivuudelle yksikkö on vuosienvälisen vaihtelun keskihajonta (sigma).

{11.1; 11.3; 11.4; 11.6; 11.9; kuvat 11.12, 11.15, 11.6, 11.7 ja 11.18}

12.4, TS.2.4, TS.2.6} (kuva SPM.6)

B.2.4 On hyvin todennäköistä, että ilmaston lämmetessä suurimmassa osassa maailmaa kovat sateet voimistuvat ja yleistyvät. Maailmanlaajuisesti kaikkein suurimpien vuorokausisademäärien ennustetaan kasvavan noin 7 % aina ilmaston lämmetessä yhdellä asteella. Voimakkaiden trooppisten hirmumyrskyjen (voimakkuusluokat 4–5) suhteellisen osuuden ja niissä puhaltavien kovimpien tuulien nopeuksien ennustetaan niinkään kasvavan.

{8.2, 11.4, 11.7, 11.9, yhdistävä tekstilaatikko 11.1, tekstilaatikko TS.6, TS.4.3.1} (kuvat SPM.5 ja SPM.6)

B.2.5 Ilmastonmuutoksen edetessä ikeiroudan sekä talvisen lumipeitteen, roudan ja napamerien jääpeitteen sulaminen jatkuu. Pohjoiset meret todennäköisesti lainehtivat syyskuussa (kuukausi jona jääpeite on suppeimmillaan) käytännössä jäätöminä³¹ ainakin kerran ennen vuotta 2050. Jäätömiä tilanteita esiintyy luonnollisesti kaikista useammin voimakkaan lämpenemisen skenaarioissa. Eteläisten napamerien jääpeitteen muutosennusteet sen sijaan ovat varsin epävarmoja.

{4.3, 4.5, 7.4, 8.2, 8.4, tekstilaatikko 8.2, 9.3, 9.5, 12.4, yhdistävä tekstilaatikko 12.1, atlas.5, atlas.6, atlas.8, atlas.9, atlas.11, TS.2.5} (kuva SPM.8)

³¹Pohjoisen jäämeren katsotaan olevan 'käytännössä jäätön', jos kuukauden keskimääräinen merijään pinta-ala on alle miljoona neliökilometriä, eli noin 15 % syyskuun keskimääräisestä merijään laajuudesta vuosina 1979–1988.

B.3 Ilmaston lämpenemisen ennustetaan yhä voimistavan maailmanlaajuista veden kiertokulkua ja sen ajallisia vaihteluita. Monsuunisateet voimistuvat. Tulevaisuudessa sekä kovat sateet että kuivat jaksot käyvät ankarammiksi.

{4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, tekstilaatikko 8.2, 11.4, 11.6, 11.9, 12.4, atlas.3} (kuva SPM.5, kuva SPM.6)

B.3.1 Edellisen IPCC-raportin ilmestymisen jälkeen on saatu lisää näyttöä siitä, että lämpötilojen noustessa maailmanlaajuinen veden kiertokulku voimistuu. Maa-alueilla sademäärien ja vesistöjen virtaamien ennustetaan yleensä vaihtelevan entistä enemmän. Kun tarkastellaan maapallon kaikkien manneralueitten keskiarvoa, keskimääräisen vuotuisen sademäärän ennustetaan kasvavan erittäin alhaisten kasvihuonekaasupäästöjen SSP1-1.9-skenaariossa 0–5 %, keskiskenaariossa (SSP2-4.5) 1,5–8 % ja erittäin suurten päästöjen SSP5-8.5-skenaariossa 1–13 %; tässä on verrattu vuosien 2081–2100 ilmastoa jaksoon 1995–2014. Sateitten ennustetaan lisääntyvän korkeilla leveysasteilla, Tyynen valtameren päiväntasaajan läheisellä vyöhykkeellä sekä osissa monsuuni-ilmaston alueita. Vastaavasti SSP2-4.5-, SSP3-7.0 ja SSP5-8.5-skenaarioitten toteutuessa sateet vähenevät osissa subtrooppisia alueita ja paikoin trooppisilla alueilla. Sellaisten alueitten kokonaispinta-alan, joissa keskimääräinen sademäärä joko lisääntyy tai vähenee tilastollisesti merkitsevästi ainakin jonakin vuodenaikana, ennustetaan kasvavan. Lumet sulavat keväällä entistä aikaisempaan, ja lumisen ilmaston alueilla virtaamat vähenevät kesäisin.

{4.3, 4.5, 4.6, 8.2, 8.4, atlas.3, TS.2.6, TS.4.3, tekstilaatikko TS.6} (kuva SPM.5)

B.3.2 Lämpenevässä ilmastossa sekä erittäin runsaita sateita että kuivuutta koetaan maailmanlaajuisesti entistä enemmän, mikä tuo mukanaan yhtäältä tulvia ja toisaalta veden niukkuutta. Näiden muutosten suunta eri alueilla riippuu ilmakehän virtausten alueellisista muutoksista, kuten monsuuni-kiertoliikkeesta ja keskileveysasteiden myrskyradoista. Ainakin SSP2-4.5-, SSP3-7.0- ja SSP5-8.5-skenaarioitten toteutuessa on hyvin todennäköistä, että El Niño -ilmiöön liittyvät sademäärien vaihtelut voimistuvat vuosisadan jälkipuoliskolla.

{4.3, 4.5, 4.6, 8.2, 8.4, 8.5, 11.4, 11.6, 11.9, 12.4, TS.2.6, TS.4.2, tekstilaatikko TS.6} (kuva SPM.5, kuva SPM.6)

B.3.3 Monsuunisateiden ennustetaan keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä pääsääntöisesti lisääntyvän, erityisesti Etelä-, Kaakkois- ja Itä-Aasiassa sekä Länsi-Afrikassa läntisintä Sahelin aluetta lukuunottamatta. Monsuunikauden ennustetaan alkavan Etelä- ja Pohjois-Amerikassa sekä Länsi-Afrikassa entistä myöhemmin ja vastaavasti päättyvän myöhemmin Länsi-Afrikassa.

{4.4, 4.5, 8.2, 8.3, 8.4, tekstilaatikko 8.2, tekstilaatikko TS.13}

B.3.4 Korkeitten kasvihuonekaasupäästöjen skenaarioissa (SSP3-7.0, SSP5-8.5) eteläisen pallonpuoliskon keskileveysasteitten myrskyradat ja niihin liittyvät sateet näyttävät pitkällä aikavälillä siirtyvän kesäisin kohti etelää ja voimistuvan. Lähitulevaisuudessa stratosfäärin otsonikerroksen elpyminen vaikuttaa kuitenkin päinvastaiseen suuntaan. Pohjoisen Tyynen valtameren alueella matalapaineitten reittien ja niihin liittyvien sateiden ennustetaan siirtyvän pohjoisemmaksi, kun taas Pohjois-Atlantin myrskyratojen mahdollisesta siirtymisestä ei voida sanoa mitään varmaa.

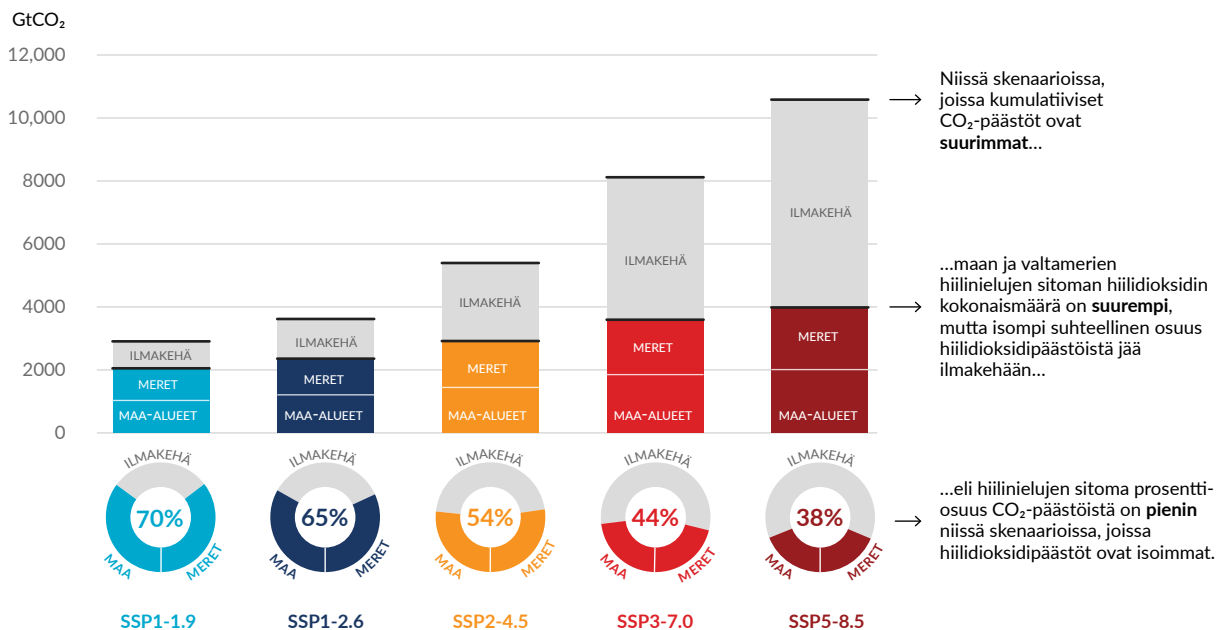
{4.4, 4.5, 8.4, TS.2.3, TS.4.2}

B.4 Niissä skenaarioissa, joissa hiilidioksidipäästöt kasvavat, valtamerien ja maa-alueitten hiilinielujen ennustetaan olevan tulevaisuudessa vähemmän tehokkaita, jolloin entistä isompi osa hiilidioksidipäästöistä jää ilmakehään.

{4.3, 5.2, 5.4, 5.5, 5.6} (kuva SPM.7)

Maa-alueitten ja valtamerien hiilinielujen kyky sitoa hiilidioksidia ilmakehästä on suhteellisesti ottaen heikompi niissä skenaarioissa, joissa hiilidioksidipäästöt ovat suuria.

Maa-alueitten ja valtamerien sitoman hiilidioksidin (CO₂) kokonaismäärä (värit) ja ilmakehään jäänyt hiilidioksidi (harmaa) vuosina 1850–2100 viiden kasvihuonekaasuskenaarioiden perusteella



Kuva SPM.7. Maa-alueitten ja merien sitomat (värit) ja ilmakehään jäävät (harmaa) kumulatiiviset hiilidioksidimäärät vuoteen 2100 mennessä — viittä kasvihuonekaasuskenaariota vastaavat arviot.

Maa-alueitten ja merien nielujen imemiä kumulatiivisia hiilidioksidimääriä vuosina 1850–2100 on simuloitu mallien avulla käyttäen pohjana viittä kasvihuonekaasuskenaariota (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 ja SSP5-8.5). Hiilinielujen tehokkuuteen vaikuttavat niin menneet, nykyiset kuin tulevatkin päästöt. Sen tähden myös kumulatiivisia nieluja tarkastellaan koko jaksolla 1850–2100. Tähän mennessä (v. 1850–2019) nielut ovat sitoneet päästöistä 1430 GtCO₂:ta eli 59 %.

Pylväskaaviot osoittavat vuosien 1850 ja 2100 välisenä aikana ilmakehään jäävien (harmaa osa) sekä maaperään ja kasvillisuuteen ynnä meriin (värillinen osa) sitoutuneitten kumulatiivisten CO₂-päästöjen (GtCO₂) arvioituja määriä. **“Donitsikaaviot”** kertovat nielujen poistamien ja ilmakehään jääneiden päästöjen suhteelliset osuudet tuona ajanjaksona. Renkaitten sisällä olevat prosenttiluvut osoittavat, kuinka suuren osuuden yhteenlasketuista päästöistä maa- ja valtamerinielut ovat yhdessä pystyneet imemään itseensä. Ihmisten tuottamat hiilidioksidin kokonaispäästöt on laskettu lisäämällä CMIP6-skenaariotietokannan mukaiset maailmanlaajuiset maankäytön nettopäästöt muihin eri sektorien päästöihin, jotka on laskettu ilmastomallien tuottamien CO₂-pitoisuuksien perusteella.³³

{5.2.1; taulukko 5.1; 5.4.5; kuva 5.25; tekstilaatikko TS.5; tekstilaatikko TS.5, kuva 1}

³³ Muitten toimialojen CO₂-päästöt lasketaan mallisimulaatioissa jäännösterminä ottaen huomioon maan ja valtamerien CO₂-nielut ja ilmakehän CO₂-pitoisuuden muutokset.

B.4.1 Maa-alueitten ja valtamerien luonnollisten hiilinielujen ennustetaan absoluuttisessa mielessä sitovan enemmän hiilidioksidia suurten kuin pienten hiilidioksidipäästöjen skenaarioissa. Kuitenkin suurilla hiilidioksidipäästöillä nielujen teho suhteellisesti ottaen heikkenee. Kumulatiivisten hiilidioksidipäästöjen kasvaessa siis yhä pienempi osuus hiilidioksidista päättyy maahan, kasvipeitteeseen ja meriin, ja vastaavasti yhä suurempi osuus päästöistä jää ilmakehään.
{ 5.2, 5.4, tekstilaatikko TS.5 } (kuva SPM.7)

B.4.2 Mallilaskelmien perusteella keskitasaisen SSP2-4.5-kasvihuonekaasuskenaarion toteutuessa maa-alueitten ja merien hiilinielujen tehon ennustetaan heikkenevän vuosisadan jälkipuoliskolla. Alhaisten kasvihuonekaasupäästöjen skenaarioissa (SSP1-1.9 ja SSP1-2.6) ilmakehän hiilidioksidipitoisuudet kääntyvät myöhemmin tällä vuosisadalla laskuun, ja tuolloin maa-alueet ja meret sitoivat entistä vähemmän hiiltä³². SSP1-1.9-skenaarion toteutuessa ne jopa muuttuvat vuoteen 2100 mennessä heikoiksi nettolähteiksi. On kuitenkin erittäin epätodennäköistä, että maan ja valtamerien yhteenlaskettu maailmanlaajuinen hiilinielu muuttuisi lähteeksi ennen vuotta 2100, elleivät CO₂:n nettopäästöt sitä ennen käänny negatiivisiksi; SSP2-4.5-, SSP3-7.0- ja SSP5-8.5-skenaarioissa nettopäästöt pysyvät positiivisina kautta tämän vuosisadan.
{ 4.3, 5.4, 5.5, 5.6, tekstilaatikko TS.5, TS.3.3 }

B.4.3 Jos CO₂-päästöt jatkavat kasvuaan, ilmastonmuutoksen vaikutus hiilen kiertokulkuun käy yhä voimakkaammaksi mutta samalla myös vaikeammin ennakoitavaksi. Mallikokeet kuitenkin osoittavat, että ilmakehän hiilidioksidipitoisuuksia ennustettaessa päästöskenaarioiden väliset erot ovat suurin yksittäinen epävarmuustekijä ainakin vuoteen 2100 asti. Lämpenemisen aiheuttamia ekosysteemien toiminnan muutoksia, kuten kosteikoista vapautuvaa hiilidioksidia ja metaania, ikiroudan sulamista ja metsäpaloja, ei ole vielä täysin pystytty sisällyttämään ilmastomalleihin. Nämä ilmiöt saattavat edelleen lisätä näiden kasvihuonekaasujen pitoisuuksia ilmakehässä.
{ 5.4, tekstilaatikko TS.5, TS.3.2 }

B.5 Jotkut kasvihuonekaasupäästöistä aiheutuvat ilmastojärjestelmän muutokset ovat satojen ja tuhansien vuosien aikavälillä luonteeltaan pysyviä. Erityisesti tämä koskee valtameriä, mannerjäätiköitä ja meren pinnan korkeutta.
{ 2.3, yhdistävä tekstilaatikko 2.4, 4.3, 4.5, 4.7, 5.3, 9.2, 9.4, 9.5, 9.6, tekstilaatikko 9.4 } (kuva SPM.8)

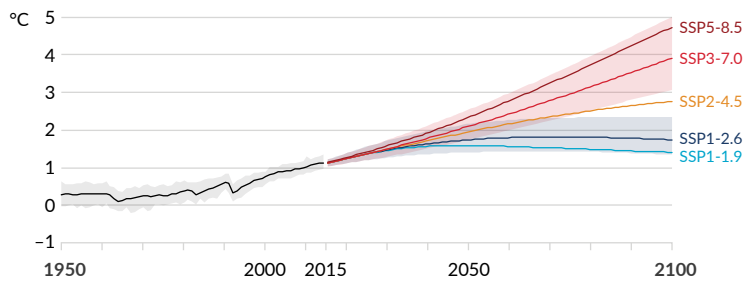
B.5.1 Jo tähänastiset kasvihuonekaasupäästöt aiheuttavat sen, että merien lämpeneminen jatkuu vielä kauan. Tämän vuosisadan aikana meret todennäköisesti lämpenevät vielä 2–4 kertaa (SSP1-2.6-skenaario) tai jopa 4–8 kertaa (SSP5-8.5-skenaario) niin paljon kuin vuosien 1971–2018 välillä. Merenpinnan ja syvempien kerrosten väliset lämpötilaerot kasvavat, merivesi muuttuu happamammaksi ja happipitoisuudet alenevat; muutosten nopeus riippuu tulevista päästöistä. Merien lämpötilat sekä syvänteitten veden pH-arvo ja happipitoisuus eivät palaudu lähelle ilmastomuutosta edeltävää tilaa satoihin eivätkä edes tuhansiin vuosiin.
{ 4.3, 4.5, 4.7, 5.3, 9.2, TS.2.4 } (kuva SPM.8)

B.5.2 Vuoristo- ja napajäätiköitten sulaminen jatkuu vääjäämättä vielä kymmeniä tai satoja vuosia. Hiilen vapautuminen sulavasta ikiroudasta niin ikään jatkuu satoja vuosia. Grönlannin mannerjäätikön kutistuminen jatkuu tämän vuosisadan aikana käytännössä satavarmasti, ja myös Etelämantereen jäätikön massa todennäköisesti pienentyy. Sen sijaan vielä ei pystytä arvioimaan, ovatko Etelämantereen jäätikön jotkut osat mahdollisesti niin epävakaita, että niistä voisi ruveta irtoamaan suuria

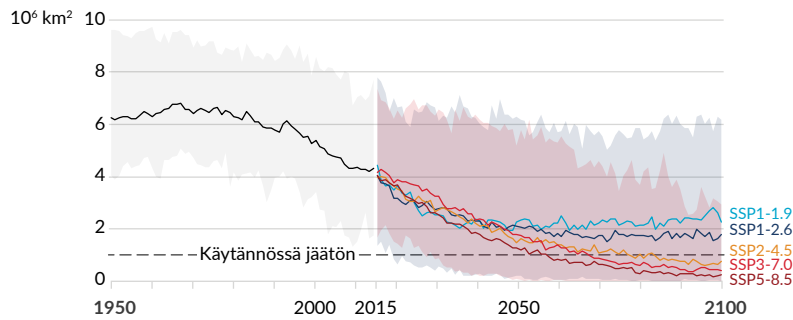
³²Laskettaessa jäljellä olevaa hiilibudjettia (tämän yhteenvedon kappale “D”) hiilinielujen mukautuminen ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden stabiloitumiseen tai laskuun on otettu huomioon.

Ihmisten toiminta vaikuttaa kaikkiin ilmastojärjestelmän osiin. Osa muutoksista ilmenee täysimääräisinä kymmenien ja toiset vasta satojen vuosien kuluessa.

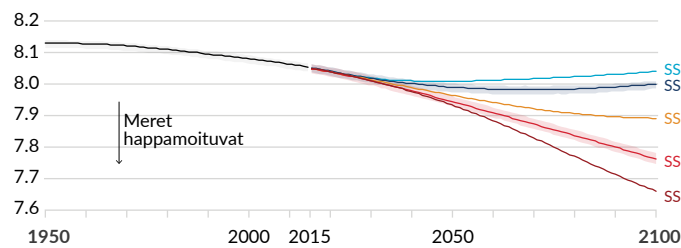
(a) Maapallon keskimääräisen pintalämpötilan muutos suhteessa vuosien 1850–1900 ilmastoon



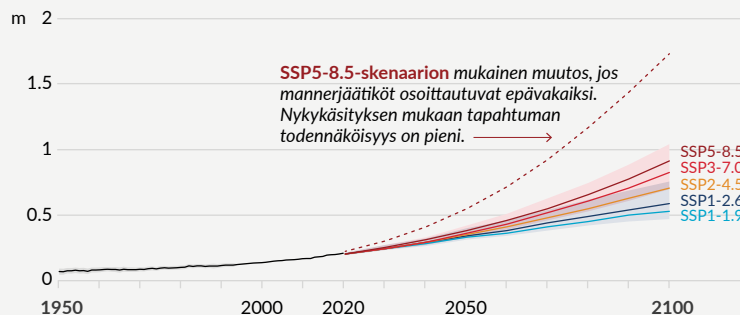
(b) Pohjoisten merien jään laajuus syyskuussa



(c) Valtamerien pinnan pH-arvo (kuvaava veden happamuutta)

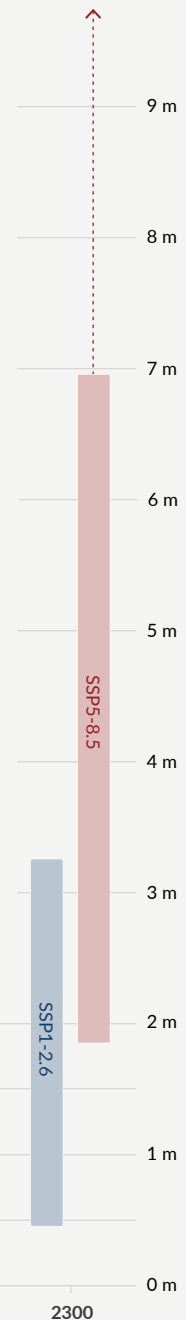


(d) Maailmanlaajuinen keskimääräinen merenpinnan korkeuden muutos verrattuna vuoteen 1900



(e) Maailmanlaajuinen merenpinnan korkeuden muutos v. 2300 mennessä verrattuna v. 1900 tasoon

Yli 15 metrin merenpinnan nousu ei ole mahdottomuus, jos päästöt ovat suuria



Kuva SPM.8. Ilmastomuutoksen vaikutuksia ilmastojärjestelmän eri osissa viiden SSP-skenaarion perusteella.

Kutakin viittä SSP-skenaariota vastaavat ennusteet on esitetty eri väreillä. Varjostetut alueet kuvaavat ennustuksen epävarmuusvälejä (näytetty ainoastaan SSP1-2.6- ja SSP3-7.0-skenaarioille). Mustat käyrät esittävät historiallisten simulaatioitten tuloksia (**kuvaosiot (a), (b) ja (c)**) tai havaittua muutosta (**kuvaosio d**).

Kuvaosio (a): Maapallon keskilämpötilan muutokset (asteina) verrattuna jaksoon 1850–1900. Muutokset on laskettu tarkastelemalla samanaikaisesti ilmastomallikokeitten tuloksia ja tähänastisten havaittujen muutosten perusteella määräytyviä reunaehtoja. Huomioon on otettu myös tasapainotilaa vastaavan ilmaston herkkyyksiluvun päivitetty arvio (katso tekstilaatikko SPM.1). Muutokset verrattuna jakson 1850–1900 ilmastoon on saatu lisäämällä vuosien 1995–2014 suhteen laskettuihin muutoksiin 0,85 °C (havaittu lämpeneminen jaksojen 1850–1900 ja 1995–2014 välillä).

Kuvaosio (b): Pohjoisten merien jään pinta-ala syyskuussa (10^6 km^2) mallisimulaatioiden perusteella. Keskisuurten ja korkeiden kasvihuonekaasupäästöjen skenaarioissa pohjoisten napamerien ennustetaan tämän vuosisadan jälkipuoliskolla olevan loppukesällä lähes jäättömiä.

Kuvaosio (c): Valtamerien pinnan veden pH-arvo (happamuuden mitta) mallisimulaatioiden perusteella.

Kuvaosio (d): Keskimääräisen maailmanlaajuisen meren pinnan korkeuden muutos (metreinä) verrattuna vuoden 1900 tilanteeseen. Tähänastiset muutokset perustuvat havaintoihin (vedenkorkeusmittarien perusteella ennen vuotta 1992 ja sen jälkeen tekokuumittauksista), ja tulevia muutoksia arvioitaessa on otettu huomioon mallitulokset ja havaintotietojen perusteella määräytyvät reunaehdot. Merenpinnan muutosten epävarmuusarviot ovat lasketut karkeammin kuin muille suureille. Katkoviiva kuvaa ennustetta, jossa suurten mannerjäätiköitten huonosti tunnettujen ilmiöitten (nykyisen käsityksen mukaan epätodennäköiset) vaikutukset on otettu huomioon. Tuo käyrä esittää SSP5-8.5-skenaarioon perustuvien ennusteitten 83. prosenttipistettä, ja siinä on otettu huomioon mahdollisuus, että jotkut mannerjäätiköitten osat osoittautuisivat epävakaisiksi; koska tällaisten ilmiöitten ennustaminen on erittäin epävarmaa, tätä käyrää ei ole sisällytetty mukaan muilla menetelmillä laskettuun epävarmuushaarukkaan. Muutokset vuoteen 1900 verrattuna on saatu lisäämällä vuosien 1995–2014 suhteen laskettuihin muutoksiin 0,158 m (havaittu merenpinnan nousu vuodesta 1900 jaksoon 1995–2014).

Kuvaosio (e): Keskimääräisen maailmanlaajuisen merenpinnan korkeuden muutos v. 2300 (metreinä) verrattuna vuoteen 1900. Mukana ovat ainoastaan SSP1-2.6- ja SSP5-8.5-skenaariot, sillä muille skenaarioille vuoteen 2300 ulottuvia simulaatioita on käytettävissä vain vähän. Varjostus kuvaa epävarmuushaarukkaa eli tässä tapauksessa 17.–83. prosenttipisteen rajaamaa aluetta. Katkoviivalla piirretty nuoli näyttää SSP5-8.5-skenaarioon perustuvien ennustusten todennäköisyysjakauman 83. prosenttipisteen ylittävän osuuden; siinä on otettu huomioon nykyisen tiedon valossa epätodennäköisenä pidetty mannerjäätiköitten epästabiilisuus.

Kuvaosioissa (b) ja (c) on mukana ilmastojärjestelmän sisäisen vaihtelun vaikutus. **Kuvaosiot (a), (d) ja (e)** esittävät pitkän aikavälin keskiarvoja, joten niissä sisäisen vaihtelun osuus jää pieneksi.

{4.3; kuvat 4.2, 4.8 ja 4.11; 9.6; kuva 9.27; kuviot TS.8 ja TS.11; tekstilaatikko TS.4, kuva 1 }

määriä jäätä. Jos kasvihuonekaasujen tulevat päästöt ovat suuria, tämä ilmiö saattaisi huomattavasti nopeuttaa merenpinnan kohoamista satojen vuosien ajan.³⁴

{4.3, 4.7, 5.4, 9.4, 9.5, tekstilaatikko 9.4, tekstilaatikko TS.1, TS.2.5 }

B.5.3 On lähes varmaa, että maailmanlaajuisesti meren pinta kohoaa edelleen tällä vuosisadalla. Verrattuna vuosien 1995–2014 tilanteeseen pinta nousee erittäin alhaisten kasvihuonekaasupäästöjen SSP1-1.9-skenaarion mukaan vuoteen 2100 mennessä 0,28–0,55 metriä; alhaisten kasvihuonekaasupäästöjen SSP1-2.6-skenaariossa 0,32–0,62 m; SSP2-4.5- eli keskiskenaariossa 0,44–0,76 m; ja erittäin korkeiden kasvihuonekaasupäästöjen SSP5-8.5-skenaariossa 0,63–1,01 m. Vuoteen 2150

³⁴ Etelämantereen jäätikön mahdollinen epävakaus on esimerkki ilmiöstä, jonka todennäköisyys on alhainen tai tuntematon, mutta mahdolliset vaikutukset voivat olla järkyttäviä. Keikahduspiste ("tipping point") on sellainen kriittinen kynnyks, jonka ylittyessä järjestelmä asettuu uuteen tilaan, usein äkillisesti ja/tai peruuttamattomasti.

mennessä nousua olisi odotettavissa 0,37–0,86 m (SSP1-1.9), 0,46–0,99 m (SSP1-2.6), 0,66–1,33 m (SSP2-4.5) tai 0,98–1,88 m (SSP5-8.5).³⁵ Ei kuitenkaan voida sulkea pois sellaista mahdollisuutta, että meren pinta kohoaisi selvästi näitä arvioita nopeammin – SSP5-8.5-skenaarion toteutuessa vuoteen 2100 mennessä lähes kaksi ja vuoteen 2150 viisi metriä. Näin siksi, että mannerjäätiköitten käyttäytymistä ymmärretään vielä huonosti.

{4.3, 9.6, tekstilaatikko 9.4, tekstilaatikko TS.4} (kuva SPM.8)

B.5.4 Pitkällä aikavälillä merenpinnan nousu jatkuu väkisinkin satoja ja tuhansiakin vuosia. Tämä johtuu syvien vesikerrosten vielä pitkään jatkuvasta lämpenemisestä ja jäätiköiden sulamisesta. Nousun joskus aikanaan tasaannuttua meren pinta pysyy korkealla tuhansia vuosia. Jos ilmaston lämpeneminen saadaan rajoitettua 1,5 asteeseen, meren pinta nousisi silloinkin lähimpien 2000 vuoden aikana noin 2–3 metriä; jos maapallon keskilämpötila nousee 2 °C, 2–6 metriä, ja jos lämpeneminen yltää 5 asteeseen, niin 19–22 metriä. Nämä arviot ovat kylläkin melko epävarmoja. Merenpinnan kohoaminen jatkunee vielä seuraavina vuosituhansinakin. Tuhansien vuosien aikana odotettavissa olevaa merenpinnan nousua voidaan arvioida kauan sitten menneisyydessä esiintyneitten lämpimien ilmastokausien tietojen avulla. Noin 125 000 vuotta sitten, jolloin maapallon keskilämpötilat olivat 0,5–1,5 °C korkeampia kuin v. 1850–1900, meri lainehti arviolta 5–10 metriä korkeammalla kuin nykyään. Vastaavasti noin 3 miljoonaa vuotta sitten maapallo oli 2,5–4 °C nykyistä lämpimämpi ja merenpinta peräti 5–25 m korkeammalla.

{2.3, yhdistävä tekstilaatikko 2.4, 9.6, tekstilaatikko TS.2, tekstilaatikko TS.4, tekstilaatikko TS.9}

C. Ilmastotietoa riskien arviointia ja alueellista sopeutumista varten

Tieteellisen tiedon perusteella on mahdollista arvioida, millä tavalla ilmasto muuttuu, kun otetaan huomioon niin ihmiskunnan toiminta, luonnolliset pakotetekijät kuin ilmastojärjestelmän sisäinen luonnollinen vaihtelukin. Tietoa ilmaston tulevasta muutoksista ja muutokseen liittyvistä epävarmuustekijöistä tarvitaan mm. arvioitaessa ilmastomuutoksen mukanaan tuomia riskejä ja suunniteltaessa sopeutumista muuttuvaan ilmastoon. Tärkeää on myös ottaa huomioon sellaiset mahdolliset voimakkaat muutokset, joitten todennäköisyys on pieni mutta vaikutukset hyvin suuria. Maailmanlaajuisia, alueellisia ja paikallisia ilmastomuutoksia ennustettaessa hyödynnetään monenlaisia tietolähteitä, mm. havaintotietoja ja ennen kaikkea ilmastomallien tuloksia.

C.1 Luonnolliset pakotetekijät ja sisäinen vaihtelu vaikuttavat osaltaan ilmastoon, etenkin kun tarkastellaan pieniä alueita ja lähitulevaisuuden ilmastoa. Sadan vuoden aikavälillä niitten osuus maapallon ilmaston lämpenemisessä on kuitenkin pieni. Varauduttaessa muuttuvaan ilmastoon luonnolliset tekijät on tärkeä ottaa huomioon, kun halutaan saada käsitys tulevan ilmastomuutoksen epävarmuushaarukasta.

{1.4, 2.2, 3.3, yhdistävä tekstilaatikko 3.1, 4.4, 4.6, yhdistävä tekstilaatikko 4.1, tekstilaatikko 7.2, 8.3, 8.5, 9.2, 10.3, 10.4, 10.6, 11.3, 12.5, atlas.4, atlas.5, atlas.8, atlas.9, atlas.10, atlas.11}

C.1.1 Pintalämpötilan havainnot kertovat, että vuosikymmenten väliset ilmaston vaihtelut ovat vuoroin voimistaneet ja vuoroin vaimentaneet ihmiskunnan päästöjen aiheuttamaa pitkän aikavälin lämpimistä. Tällainen vaihtelu jatkuu myös tulevaisuudessa. Esimerkiksi vuosina 1998–2012 ilmaston sisäinen vaihtelu sekä auringon aktiivisuuden heilahtelut ja tulivuorenpurkaukset osittain peittivät

³⁵ Jos näitä lukuarvoja halutaan verrata edellisessä IPCC-raportissa käytettyyn perusjaksoon 1986–2005, arvioihin tulee lisätä 0,03 metriä. Jos taas vertailuajankohtana on kuvan SPM.8(d) mukaisesti vuosi 1900, on lisättävä 0,16 m.

alleen ihmisten aiheuttaman ilmaston lämpenemisen. Siitä huolimatta varsinainen ilmastojärjestelmän lämpeneminen jatkui tänäkin aikana, mikä ilmeni sekä merien jatkuvana lämpenemisenä että entistä kuumempien ääriämpötilojen esiintymisenä maa-alueilla.

{1.4, 3.3, yhdistävä tekstilaatikko 3.1, 4.4, tekstilaatikko 7.2, 9.2, 11.3, yhdistävä tekstilaatikko TS.1} (kuva SPM.1)

C.1.2 Sisäinen vaihtelu³⁷ pystyy sekä voimistamaan että vaimentamaan ihmisten aiheuttamia muutoksia keskimääräisessä ilmastossa ja erilaisissa ilmastollisissa vaikutusilmiöissä³⁶. On täysin mahdollista, että ilmasto saattaa joillakin alueilla jopa jäähtyä lähitulevaisuudessa, eikä tällainen lyhytaikainen paikallinen viilentyminen ole millään muotoa ristiriidassa ihmiskunnan aiheuttaman maapallon keskilämpötilan pitkän aikavälin nousun kanssa.

{1.4, 4.4, 4.6, 10.4, 11.3, 12.5, atlas.5, atlas.10, atlas.11, TS.4.2}

C.1.3 Monilla alueilla sisäinen vaihtelu selittää suurelta osin tähänastiset havaitut sademäärien muutokset vuosikymmenestä toiseen. Sisäinen vaihtelu myös pitkälti määrää monsuunisateitten muutokset lähitulevaisuudessa. Paitsi sisäisen vaihtelun tähden, sademäärien ennustetut lähiajan muutokset ovat epävarmoja myös mallitulosten erojen ja pienhiukkasiin liittyvän pakotteen epävarmuuden takia.

{1.4, 4.4, 8.3, 8.5, 10.3, 10.4, 10.5, 10.6, atlas.4, atlas.8, atlas.9, atlas.10, atlas.11, TS.4.2, tekstilaatikko TS.6, tekstilaatikko TS.13}

C.1.4 Kun tutkitaan aikaisemmin sattuneita tulivuorenpurkauksia, näyttäisi todennäköiseltä, että tämän vuosisadan aikana sattuu ainakin yksi suuri räjähdysmäinen tulivuorenpurkaus.³⁸ Tällainen purkaus alentaisi maapallon keskilämpötilaa ja pienentäisi sademääriä erityisesti maa-alueilla 1–3 vuoden ajan. Purkauksen vaikutus näkyisi myös monsuunikiertoliikkeen voimakkuudessa, rankkasateitten esiintymisessä ja monissa muissa merkittävässä ilmastollisissa ilmiöissä. Jos tällainen purkaus tapahtuu, se saattaisi tilapäisesti pysähdyttää ilmaston lämpiämisen.

{2.2, 4.4, yhdistävä tekstilaatikko 4.1, 8.5, TS.2.1}

C.2 Ilmaston lämpenemisen jatkuessa on ilmeistä, että eri puolilla maailmaa koetaan yhä useammin sellaisia ilmastollisia vaikutusilmiöitä, joissa useampi ilmastosuure saa samanaikaisesti poikkeuksellisia arvoja. Muutokset olisivat voimakkaampia maapallon keskilämpötilan noustessa kahdella kuin puolellatoista asteella. Jos maapallon ilmasto lämpenee tätä enemmän, muutokset olisivat vieläkin yleisempiä ja vahvempia.

{8.2, 9.3, 9.5, 9.6, tekstilaatikko 10.3, 11.3, 11.4, 11.5, 11.6, 11.7, 11.9, tekstilaatikko 11.3, tekstilaatikko 11.4, yhdistävä tekstilaatikko 11.1, 12.2, 12.3, 12.4, 12.5, yhdistävä tekstilaatikko 12.1, atlas.4, atlas.5, atlas.6, atlas.7, atlas.8, atlas.9, atlas.10, atlas.11} (kuva SPM.9)

C.2.1 Kaikilla alueilla³⁹ ennustetaan esiintyvän tulevaisuudessa yhä enemmän kuumuuteen liittyviä ilmastollisia ilmiöitä ja vähemmän kylmyyteen liittyviä ilmiöitä. Ikiroudan, lumen ja jäätiköitten se-

³⁷Tärkeimpiä ilmaston sisäiseen vaihteluun liittyviä ilmiöitä ovat El Niño – Eteläinen värähtely sekä Tyynen valtameren ja Atlantin valtameren merivirtojen vaihtelut vuosikymmenestä toiseen.

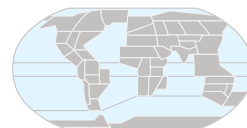
³⁶Ilmastolliset vaikutusilmiöt (“climate impact drivers”, lyhenne “CID”) ovat sellaisia ilmastojärjestelmän muutoksia tai tapahtumia (esim. keskimääräisen ilmaston muutoksia tai ääri-ilmiöitten esiintymisiä), joilla on vaikutusta yhteiskuntaan tai eloliseen luontoon. Tilanteesta riippuen vaikutukset voivat olla haitallisia, hyödyllisiä, neutraaleja tai kaikkia niitä yhdellä kertaa. Ilmiöt voivat liittyä korkeisiin tai alhaisiin lämpötiloihin, runsaisiin sateisiin tai kuivuuteen, tuuliin, lumen ja jäähän sekä rannikolla tai avomerellä esiintyviin ilmiöihin.

³⁸Viimeksi kuluneitten 2500 vuoden tietojen nojalla sellaisia tulivuorenpurkauksia, joista aiheutuu negatiivista säteilypakotetta vähintään 1 Wm^{-2} , on esiintynyt keskimäärin kaksi kertaa vuosisadassa.

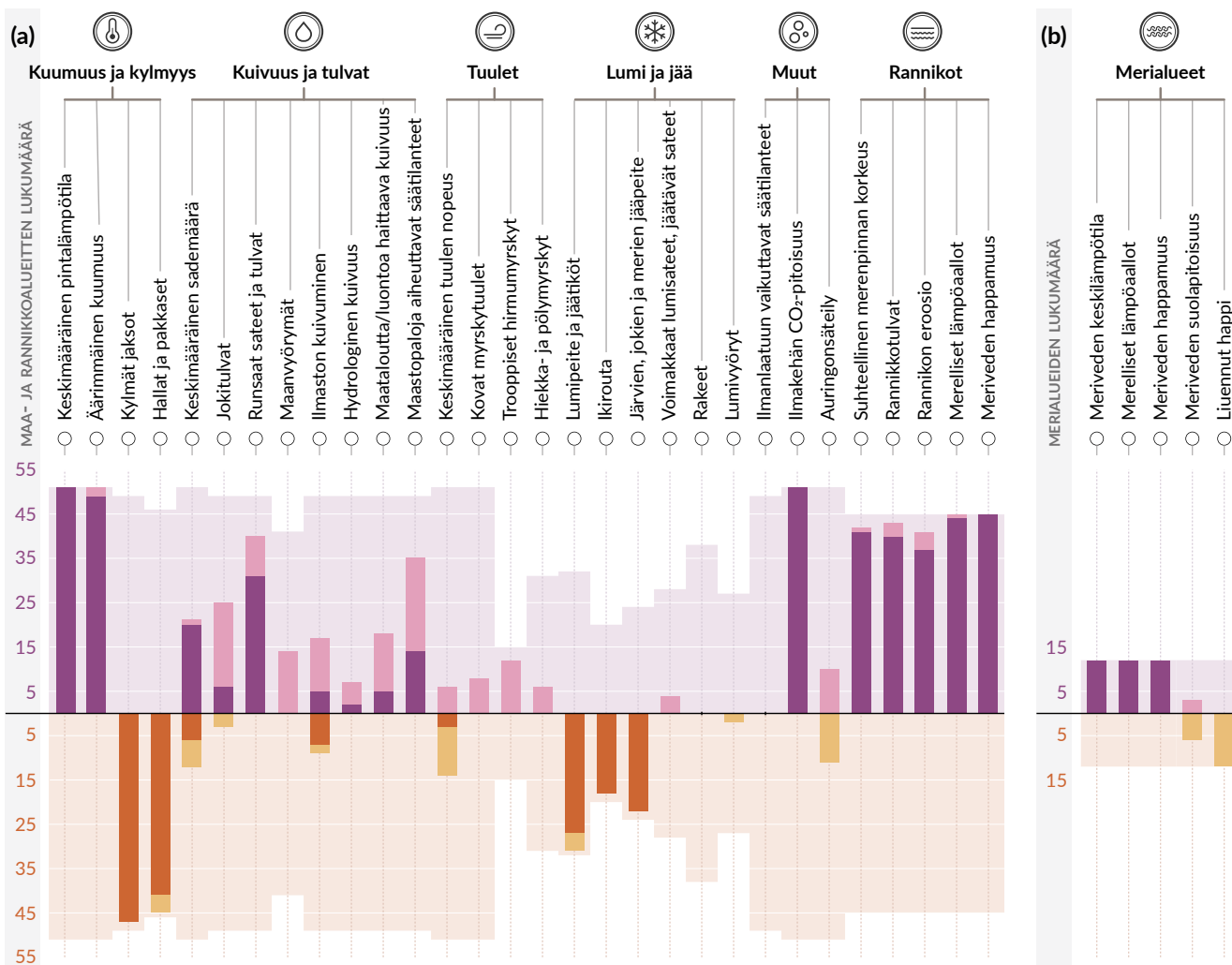
³⁹Tässä viitataan pääraportissa käytettyyn aluejakoon, jonka avulla voidaan esittää alueellisia ilmastomuutoksia tiiviissä muodossa. Ellei toisin mainita, muutoksia verrataan viimeksi kuluneitten 20–40 vuoden ilmastoon. {1.4, 12.4, atlas.1}.

Erilaisten ilmastollisten vaikutusilmiöitten esiintymisen ennustetaan muuttuvan eri puolilla maailmaa.

Ilmastolliset vaikutusilmiöt (climatic impact-driver, lyhenne CID) ovat ilmastojärjestelmän ilmiöitä (esim. keskiarvojen muutoksia tai äärimmäisiä tapahtumia), jotka vaikuttavat luontoon tai johonkin yhteiskunnan osa-alueeseen. Järjestelmän sietokyvystä riippuen vaikutusilmiöt voivat olla vahingollisia, hyödyllisiä tai neutraaleja, tai niitten vaikutus voi olla eri osa-alueilla erisuuntainen. Vaikutusilmiöt on kuvassa ryhmitelty seitsemään tyyppiin, jotka on koottu kuvakkeiden alle. Kaikilla alueilla on odotettavissa muutoksia vähintäänkin viidessä eri vaikutusilmiössä. Lähes kaikkialla (96 % alueista) muutoksia ennustetaan esiintyvän vähintään 10:ssä ja puolessa alueista vähintään 15 vaikutusilmiössä. Monissa tapauksissa alueitten väliset erot ovat kuitenkin isoja.



Niiden (a) maa- ja rannikkoalueiden sekä (b) merialueiden lukumäärä, joilla mainitun ilmastollisen vaikutusilmiön ennustetaan **kasvavan/yleistyvän** tai **pienentyvän/harvinaistuvan suurella** (tumma sävy) tai **keskitasoisella varmuudella** (vaalea sävy)



VÄRIEN SELITYKSET

- Alueet, joilla **suurella varmuudella** lisääntymistä
- Alueet, joilla **kohtalaisen todennäköisesti** lisääntymistä
- Alueet, joilla **suurella varmuudella** vähenemistä
- Alueet, joilla **kohtalaisen todennäköisesti** vähenemistä

ARVIOIDUT TULEVAISUUDEN MUUTOKSET

Muutokset kuvaavat tilannetta sellaisen 20–30 vuoden pituisen jakson aikana, joka joko ajoittuu vuoden 2050 vaiheille tai kuvaa tilannetta, jolloin maapallon keskilämpötila on noussut 2 °C. Vertailukohtana toimii joko ajanjakso 1960–2014 tai 1850–1900.

Kuva SPM.9. Niiden tarkasteltujen alueiden lukumäärä, joilla ilmastollisten vaikutusilmiöiden esiintymisen ennustetaan muuttuvan.

Kuvassa on tarkasteltu 35 ilmastovaikutusilmiötä (CID), jotka on ryhmitelty seitsemään tyyppiin: kuumuus ja kylmyys; runsaat sateet ja kuivuus; tuuli; lumi ja jää; rannikkoalueet; merialueet; ja muut. Kunkin vaikutusilmiön kohdalla oleva pylväs kertoo niiden alueiden lukumäärän, joille ennustetaan muutoksia ko. ilmiössä. Värit kuvaavat muutoksen suuntaa ja varmuuden astetta: violetti osoittaa kasvua ja ruskea pientymistä; tummemmat/vaaleammat värisävyt kertovat, että muutoksen suunnasta ollaan hyvin tai vain kohtalaisen varmoja. Vaaleimmat taustavärit esittävät niiden alueiden kokonaismäärää, joilla kutakin vaikutusilmiötä ylipäänsä on mielekästä tarkastella (esim. trooppilisia hirmumyrskyjä ei esiinny ikinä viileän ilmaston alueilla, ei nyt eikä tulevaisuudessa).

Kuvaosiossa (a) on esitetty 30 maa- ja rannikkoalueiden kannalta merkityksellistä vaikutusilmiötä, kun taas **kuvaosio (b)** tarkastelee viittä merialueita koskevaa ilmiötä. Merellisiä lämpöaaltoja ja meriveden happamuutta on arvioitu erikseen rannikkoitten lähellä kuvassa (a) ja avomerialueilla kuvassa (b). Muutoksia tarkastellaan 20–30 vuoden mittaisen ajanjakson aikana, joka sijoittuu vuoden 2050 ympärille tai vastaa sitä ajankohtaa, jolloin maapallon keskilämpötila on noussut kahdella asteella teollistumista edeltävään aikaan verrattuna. Vertailukohtana toimii pääsääntöisesti jakso 1960–2014. Poikkeuksen tästä muodostaa hydrologinen sekä maataloutta ja luontoa vaivaava kuivuus, joita verrataan vuosiin 1850–1900. Alueiden sijainnit on esitetty pääraportin luvussa 12.4.

{ 11.9, 12.2, 12.4, atlas.1, taulukko TS.5, kuvat TS.22 ja TS.25 }

kä järvien ja pohjoisten merien jään ennustetaan edelleen hupenevan.⁴⁰ Nämäkin muutokset ovat voimakkaampia, jos maapallon ilmasto lämpenee kahdella asteella tai enemmän verrattuna puoleltoista asteen lämpenemiseen. Esimerkiksi maataloudelle ja ihmisten terveydelle ongelmallisten hyvin korkeitten lämpötilan kynnyksarvojen ennustetaan ylittyvän sitä useammin, mitä enemmän ilmasto lämpenee.

{ 9.3, 9.5, 11.3, 11.9, yhdistävä tekstilaatikko 11.1, 12.3, 12.4, 12.5, yhdistävä tekstilaatikko 12.1, atlas.4, atlas.5, atlas.6, atlas.7, atlas.8, atlas.9, atlas.10, atlas.11, TS.4.3 } (kuva SPM.9)

C.2.2 Jos maapallon ilmasto lämpenee puoleltoista asteella, runsaiden sateiden ja niihin liittyvien tulvien ennustetaan voimistuvan ja yleistyvän Pohjois-Amerikassa ja Euroopassa sekä suuressa osassa Afrikkaa ja Aasiaa. Lisäksi kaikilla asutuilla mantereilla Aasiaa lukuunottamatta maaperän kuivuutta ennustetaan esiintyvän entistä useammin ja ankarampana ainakin joillakin alueilla (vertailukohtana vuosien 1850–1900 ilmasto). Myös sateitten niukkuutta heijastelevan kuivuuden ennustetaan paikoin lisääntyvän.

{ 11.4, 11.5, 11.6, 11.9, atlas.4, atlas.5, atlas.7, atlas.8, atlas.9, atlas.10, atlas.11, TS.4.3 } (taulukko SPM.1)

C.2.3 Jos maapallo lämpenee kahdella asteella tai enemmän, sekä kuivuutta että runsaita sateita esiintyy enemmän kuin 1,5 asteella lämpenevässä maailmassa. Voimakkaiden sateiden ja niihin liittyvien tulvien ennustetaan voimistuvan ja yleistyvän Tyynen valtameren saarilla ja monilla Pohjois-Amerikan ja Euroopan alueilla. Luultavasti samansuuntaisia muutoksia on odotettavissa myös osissa Australiaa sekä Keski- ja Etelä-Amerikkaa. Useilla Afrikan, Etelä-Amerikan ja Euroopan alueilla maatalouteen ja luontoon vaikuttavan kuivuuden (maaperä kuivaa) ennustetaan yleistyvän ja/tai ankaroituvan; kuivuuden lisääntymistä ennakoidaan myös Australiassa, Keski- ja Pohjois-Amerikassa sekä Karibian alueella. Hydrologisen kuivuuden (alhaiset virtaamat jokivesistöissä) arvioidaan lisääntyvän paikoin Afrikassa, Australiassa, Aasiassa, Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa, ja monia aalla myös meteorologisen kuivuuden (niukasti sadetta). Keskimääräisten sademäärien ennustetaan

⁴⁰Tässä ja seuraavissa kohdissa tarkasteltujen muutosten todennäköisyydet ja luottamuksen aste riippuvat tutkittavasta alueesta. Aihetta on tarkasteltu yksityiskohtaisemmin teknillisessä yhteenvedosta ja pääraportissa.

lisääntyvän napa-alueilla, Pohjois-Euroopassa ja Pohjois-Amerikan pohjoisosissa sekä osissa Aasiaa ja Etelä-Amerikkaa.

{11.4, 11.6, 11.9, yhdistävä tekstilaatikko 11.1, 12.4, 12.5, yhdistävä tekstilaatikko 12.1, atlas.5, atlas.7, atlas.8, atlas.9, atlas.11, TS.4.3} (kuva SPM.5, kuva SPM.6, kuva SPM.9)

C.2.4 Ilmastollisia vaikutusilmiöitä esiintyy enemmän vähintään kahdella kuin puolellatoista asteella lämpenevässä maailmassa. Esimerkkeinä eri alueilla odotettavissa olevista muutoksista voidaan mainita trooppisten hirmumyrskyjen ja troopikin ulkopuolisten myrskymatalapaineitten voimistuminen, jokien tulvimisen lisääntyminen, keskimääräisten sateiden väheneminen ja kuivuuden lisääntyminen sekä maastopaloja aiheuttavien säätilanteitten yleistyminen. Sen sijaan esimerkiksi raesateitten, voimakkaitten jäätävien sateitten, rajuilmojen, pölymyrskyjen, lumipyryjen ja maanvyörymien alueellisia muutoksia on vaikea ennustaa.

{11.7, 11.9, yhdistävä tekstilaatikko 11.1, 12.4, 12.5, yhdistävä tekstilaatikko 12.1, atlas.4, atlas.6, atlas.7, atlas.8, atlas.10, TS.4.3.1, TS.4.3.2, TS.5} (kuva SPM.9)

C.2.5 Merenpinnan kohoaminen jatkuu koko tämän vuosisadan ajan, paitsi niillä muutamilla alueilla, missä maan geologinen kohoaminen (esim. viime jääkauden jäljiltä) on nopeaa. Noin kahdella kolmasosalla maailman rannikkoalueista suhteellisen merenpinnan nousun ennustetaan poikkeavan vähemmän kuin $\pm 20\%$ maailmanlaajuisesta keskimääräisestä kohoamisesta. Merenpinnan keskimäärin noustessa vesi myös kohoaa entistä useammin hyvin korkealle (esim. myrskysäällä). Sellaisia rannikkotulvia, jollaisia on lähimenneisyydessä sattunut kerran sadassa vuodessa, ennustetaan vuoteen 2100 mennessä esiintyvän yli puolessa rannikkoalueita vähintäänkin kerran vuodessa. Merenpinnan kohoaminen siis lisää tulvien esiintymistiheyttä ja voimakkuutta alavilla rannikkoalueilla sekä eroosiota hiekkarannoilla.

{9.6, 12.4, 12.5, yhdistävä tekstilaatikko 12.1, tekstilaatikko TS.4, TS.4.3} (kuva SPM.9)

C.2.6 Kaupungit ovat kuumempia kuin ympäröivä maaseutu, mikä paikallisesti pahentaa ilmaston lämpenemisen vaikutuksia. Näin ollen kaupungistumisen jatkuminen voimistaa helleaaltojen haittavaikutuksia. Kaupungistuminen luultavasti myös lisää keskimääräistä sademäärää ja voimistaa rankkasateita kaupunkien yllä ja niitten tuulen alapuolisilla alueilla. Rannikkokaupungeissa pitkän aikavälin merenpinnan nousu vaikeuttaa sellaisia tilanteita, joissa vesi kohoaa myrskysäällä hyvin korkealle. Jos tällainen meren pinnan kohoaminen osuu yksin rankkasateen tai runsaitten jokivirtaamien kanssa, yhdistelmä yhä lisää tulvimisen vaaraa.

{8.2, tekstilaatikko 10.3, 11.3, 12.4, tekstilaatikko TS.14}

C.2.7 Monilla alueilla usean ilmastomuuttujan yhdistelmänä ilmenevien ääri-ilmiöitten todennäköisyyden ennustetaan kasvavan. Erityisesti hellettä ja kuivuutta esiintyy todennäköisesti samanaikaisesti entistä useammin. Ilmastollisia ääri-ilmiöitä myös esiintyy entistä tavallisemmin monessa paikassa kerrallaan, esimerkiksi samanaikaisesti useilla keskeisillä maailman viljantuotantoalueilla. Mikäli maapallo lämpiää $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ tai enemmän, näin käy herkemmin kuin jos lämpeneminen saadaan pysähdytettyä $1,5$ asteeseen.

{11.8, tekstilaatikko 11.3, tekstilaatikko 11.4, 12.3, 12.4, yhdistävä tekstilaatikko 12.1, TS.4.3}

C.3 Joitakin ilmastonmuutoksen hyvin voimakkaita seurausvaikutuksia pidetään tällä hetkellä epätodennäköisinä. Näitä ovat mm. suurten mannerjäätiköitten romahtaminen, valtameren kiertoliikkeen äkilliset muutokset, joittenkin voimakkaitten ilmastollisten ääri-ilmiöitten samanaikainen esiintyminen ja niin voimakas maapallon keskilämpötilan nousu, että se huomattavasti ylittäisi tämänhetkisten todennäköisyysarvioitten ylärajan. Tällaiset äärimmäiset

muutokset ovat kuitenkin mahdollisia, ja ne on otettava huomioon ilmastomuutokseen liittyviä riskejä arvioitaessa.

{1.4, yhdistävä tekstilaatikko 1.3, 4.3, 4.4, 4.8, yhdistävä tekstilaatikko 4.1, 8.6, 9.2, tekstilaatikko 9.4, 11.8, tekstilaatikko 11.2, yhdistävä tekstilaatikko 12.1}

C.3.1 Jos maapallon keskilämpötilan nousu ylittää tarkasteltavaa SSP-skenaariota vastaavan epävarmuusvälin ylärajan, myös monet alueelliset ilmastolliset muutokset muodostunevat suuremmiksi kuin niille lasketun todennäköisyysvälin yläraja. Tällaisia epätodennäköisiä, odotettua voimakkaampaan lämpenemiseen liittyviä muutoksia voivat olla esimerkiksi ennustettua voimakkaammat ja useammin esiintyvät helleaallot, rankkasateet ja alueellisten sademäärien muutokset. Kyseiset muutokset muodostavat vakavan uhan ihmisille ja ympäristölle, erityisesti korkeilla kasvihuonekaasupäästöjen skenaarioilla.

{Yhdistävä tekstilaatikko 1.3, 4.3, 4.4, 4.8, tekstilaatikko 9.4, tekstilaatikko 11.2, yhdistävä tekstilaatikko 12.1, TS.1.4, tekstilaatikko TS.3, tekstilaatikko TS.4}

C.3.2 Sinänsä epätodennäköisiä mutta voimakkaasti vaikuttavia muutoksia voidaan joutua kokemaan siinäkin tapauksessa, että maapallon keskilämpötilan nousu jää arvioidun epävarmuushaarukan sisälle. Tällaisten muutosten todennäköisyys kasvaa sitä suuremmaksi mitä enemmän ilmasto lämpenee. Ilmastojärjestelmän äkillisten muutosten ja keikahdusten mahdollisuutta, kuten Etelämantereen jäätikön voimakkaasti nopeutuvaa sulamista tai metsien häviämistä laajoilta alueilta, ei voida sulkea pois.

{1.4, 4.3, 4.4, 4.8, 5.4, 8.6, tekstilaatikko 9.4, yhdistävä tekstilaatikko 12.1, TS.1.4, TS.2.5, tekstilaatikko TS.3, tekstilaatikko TS.4, tekstilaatikko TS.9}

C.3.3 Jos ilmaston lämpeneminen jatkuu, yleistyvät jotkut sellaiset monen ilmastomuuttujan ääri-ilmiöitten yhdistelmät, joiden todennäköisyys on ollut tähän mennessä pieni. Ääri-ilmiöt voivat tällöin olla niin voimakkaita, pitkäkestoisia ja laaja-alaisia, että moista ei ole havaintoaikasarjoissa koskaan esiintynyt.

{11.8, tekstilaatikko 11.2, yhdistävä tekstilaatikko 12.1, tekstilaatikko TS.3, tekstilaatikko TS.9}

C.3.4 Atlantin valtameren syvä kiertoliike heikkenee hyvin todennäköisesti tämän vuosisadan aikana. Käsitykset odotettavissa olevan heikontumisen suuruudesta kuitenkin vaihtelevat. Luultavimmin kiertoliike ei kuitenkaan ainakaan kokonaan pysähdy ennen vuotta 2100. Jos kiertoliike kuitenkin odotusten vastaisesti pysähtyisi, se muuttaisi alueellisia sääolosuhteita ja veden kiertokulkua todella paljon. Esimerkiksi tropiikin runsassateinen vyöhyke siirtyisi etelämmäksi, Afrikan ja Aasian monsuunikiertoliike heikkenisi, eteläisen pallonpuoliskon monsuunit voimistuisivat ja Euroopan sademäärät pienenisivät.

{4.3, 8.6, 9.2, TS.2.4, tekstilaatikko TS.3}

C.3.5 Myös sellaiset ennalta aavistamattomat harvinaiset luonnontapahtumat, jotka eivät aiheudu ihmiskunnan toimista, voivat vaikuttaa ilmastoon voimakkaasti. Esimerkiksi sarja suuria tulivuorenpurkauksia muutaman kymmenen vuoden aikana aiheuttaisi merkittäviä maailmanlaajuisia ja alueellisia ilmastollisia häiriöitä. Tällaisia tapahtumien mahdollisuutta ei voida sulkea pois, mutta niiden ennustamattomuuden vuoksi niitä ei ole otettu mukaan tässä raportissa tarkasteltuihin skenaarioihin.

{2.2, yhdistävä tekstilaatikko 4.1, tekstilaatikko TS.3} (tekstilaatikko SPM.1)

D. Mitä ilmastonmuutoksen rajoittaminen vaatii?

Edellisen IPCC-raportin ilmestymisen jälkeen jäljellä olevan hiilibudjetin arvioita on pystytty tarkentamaan. Kasvihuonekaasujen päästörajoitusten ohella budjetteja laskettaessa on otettava huomioon myös hengitysilman laadun parantamiseen tähtäävät toimet. On myös mahdollista arvioida, milloin päästöjen vähentämisen ilmastonmuutosta hidastava vaikutus kyetään erottamaan ilmaston sisäinen vaihtelun ja luonnollisten pakotetekijöitten synnyttämän hälyn joukosta.

D.1 Ihmisten aiheuttaman ilmaston lämpenemisen pysäyttäminen jollekin halutulle tasolle edellyttää kumulatiivisten hiilidioksidipäästöjen rajoittamista, ja pidemmän päälle hiilidioksidin nettopäästöt pitää saada putoamaan nollatasolle. Sen lisäksi muiden kasvihuonekaasujen päästöjä on vähennettävä voimakkaasti. Sekä metaanin että pienhiukkasten päästöjen leikkaaminen parantaisi hengitysilman laatua, mutta toisaalta pienhiukkasten vähentyminen vaikuttaa ilmastoon lämmittävästi. Mutta jos CH₄-päästöjä vähennetään tässä yhteydessä riittävän tehokkaasti, tämä huomattavalta osin kumoaisi pienhiukkasten vähentymisestä aiheutuva lämmitys.

{3.3, 4.6, 5.1, 5.2, 5.4, 5.5, 5.6, tekstilaatikko 5.2, yhdistävä tekstilaatikko 5.1, 6.7, 7.6, 9.6} (kuva SPM.10, taulukko SPM.2)

D.1.1 Tämä raportti vahvistaa jo edellisessä IPCC-raportissa esitetyn johtopäätöksen, että ihmisten tuottamien kumulatiivisten hiilidioksidipäästöjen ja niiden aiheuttaman ilmaston lämpenemisen välillä vallitsee likipitäen lineaarinen riippuvuus. Jokaisen ilmakehään päätyvän tuhannen gigatonnin CO₂-päästön arvioidaan lämmittävän maapalloa 0,27–0,63 °C, parhaan arvion mukaan 0,45 °C.⁴¹ Epävarmuushaarukka on nyt kapeampi kuin aikaisemmissa IPCC:n raporteissa. Lukuarvoa kutsutaan kumulatiivisia CO₂-päästöjä vastaavaksi transientiksi ilmastonmuutosvasteeksi (TCRE). Jos maapallon keskilämpötilan nousu halutaan saada pysäytettyä, ihmisten tuottamien hiilidioksidin nettopäästöjen pitää jossakin vaiheessa pakostakin pudota nollatasolle⁴². Ennen tätä ajankohtaa hiilidioksidipäästöjä saa tuottaa yhteensä ainoastaan niin paljon kuin hiilibudjetissa on varaa jäljellä.⁴³ {5.4, 5.5, TS.1.3, TS.3.3, tekstilaatikko TS.5} (kuva SPM.10)

D.1.2 Vuosina 1850–2019 ihmiskunta päästi ilmakehään hiilidioksidia yhteensä 2390±240 GtCO₂. Jäljellä oleva hiilibudjetti on laskettu usealle maapallon keskilämpötilan nousun ylärajalle ja eri todennäköisyystasojille käyttäen pohjana TCRE:lle laskettua arvoa ja sen epävarmuushaarukkaa. Laskelmissa on otettu huomioon myös maapallon tähänastinen lämpeneminen, muista kuin hiilidioksidin päästöistä aiheutuva lämpötilan nousu sekä ilmastojärjestelmän palauteilmiöt, kuten ikeiroudan sulamisesta vapautuvat päästöt. Lisäksi on huomioitu maapallon pintalämpötilan muutokset sen jälkeen,

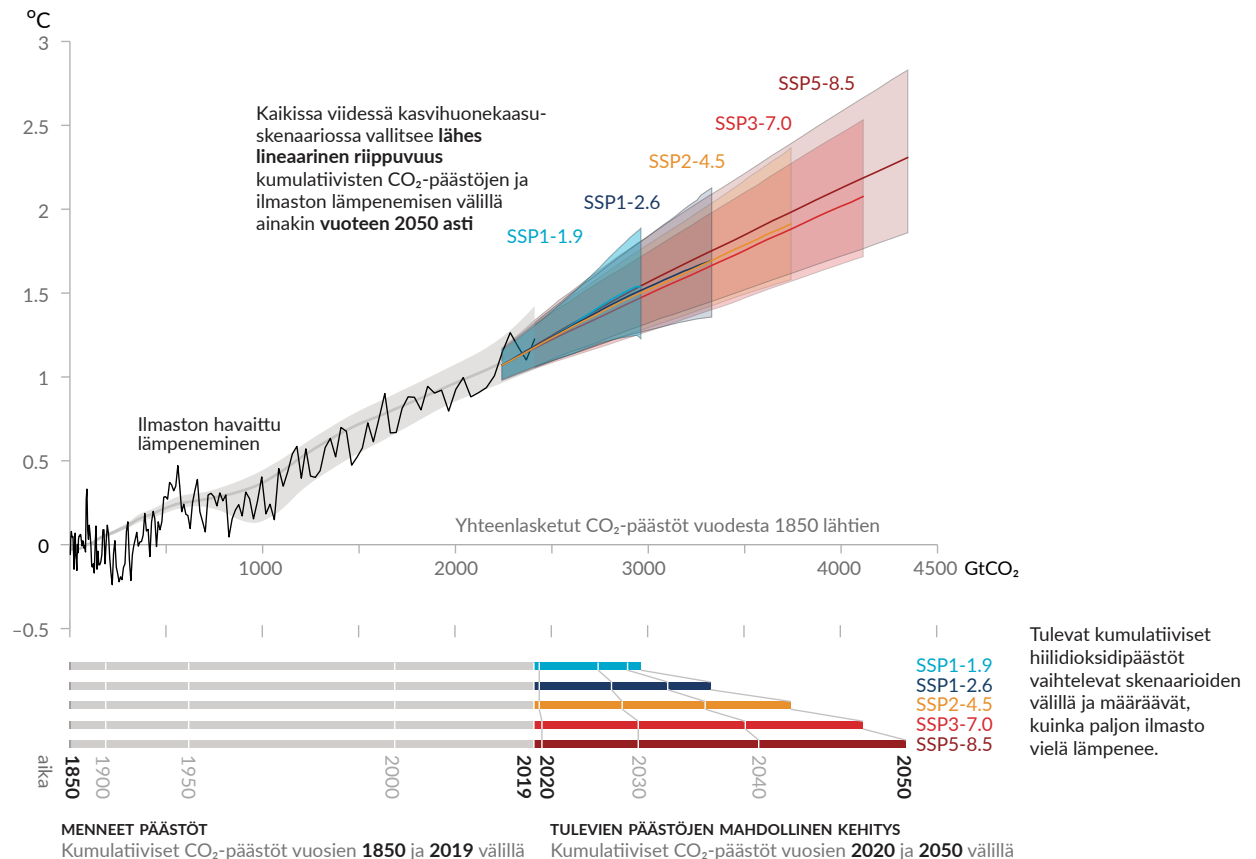
⁴¹ Kirjallisuudessa käytetään suureen yksikkönä astetta jokaista päästettyä tuhatta hiilipetagrammaa (PgC) kohden, ja pääraportissa TCRE:n epävarmuusväliksi on sen mukaisesti annettu 1,0 °C – 2,3 °C per 1000 PgC, parhaan arvion ollessa 1,65 °C.

⁴² Hiilidioksidin nettopäästöt ovat nollassa silloin, kun ilmakehään tuotetut hiilidioksidipäästöt ovat yhtä suuria kuin ihmisten omilla toimillaan aikaansaamat hiilidioksidin nielut.

⁴³ “Hiilibudjetti” tarkoittaa sellaista ihmisten tuottamien maailmanlaajuisten hiilidioksidin kumulatiivisten nettopäästöjen enimmäismäärää, joka vielä johtaisi ilmaston lämpenemisen pysymiseen tietyn valitun tason alapuolella tietyllä todennäköisyydellä, kun otetaan huomioon myös ihmisten muiden ilmastoa muuttavien toimien vaikutus. Jos päästöt on laskettu yhteen aina esiteollisesta ajasta lähtien, tätä “luvallisten” päästöjen enimmäismäärää kutsutaan kokonaishiilibudjetiksi. Vastaavasti “jäljellä oleva hiilibudjetti” kertoo, kuinka paljon lisää päästöjä voidaan vielä tuottaa nykyhetkestä (tai jostakin muusta valitusta ajankohdasta) eteenpäin. Tähänastinen ilmaston lämpiäminen selittyy pitkälti jo tuotettujen yhteenlaskettujen CO₂-päästöjen perusteella, kun taas tulevat päästöt aiheuttavat lisää lämpenemistä tästä hetkestä eteenpäin. Jäljellä oleva hiilibudjetti siis kertoo, kuinka paljon hiilidioksidia voitaisiin vielä päästää ilmakehään, mikäli maapallon lämpeneminen halutaan pitää jonkun määrätyn tason alapuolella.

Jokainen ilmakehään päästetty hiilidioksiditonni voimistaa ilmaston lämpenemistä

Maapallon keskilämpötilan nousu (°C) verrattuna ajanjaksoon 1850–1900. Lämpötilan nousu ilmaistaan kumulatiivisten CO₂-päästöjen (yksikkö GtCO₂) funktiona.



Kuva SPM.10. Kumulatiivisten CO₂-päästöjen ja maapallon pintalämpötilan nousun välinen riippuvuus.

Ylempi kuvaosio: Tähänastisten muutosten tarkastelu (ohut musta viiva) osoittaa, kuinka paljon maapallon havaittu keskilämpötila on noussut vuosina 1850–2019 siihen hetkeen mennessä toteutuneitten kumulatiivisten hiilidioksidipäästöjen (GtCO₂) funktiona. Harmaa viiva ja sitä ympäröivä varjostettu alue näyttävät, kuinka paljon maapallon olisi mallilaskelmien perusteella pitänyt lämmetä ihmisten tuottamien päästöjen tähden (vertaa kuvaan SPM.2). Värilliset viivat (mediaani) ja varjostukset (epävarmusväli) kuvaavat maapallon keskilämpötilan ennustettua tulevaa muutosta vuosina 2020–2050 kumulatiivisten CO₂-päästöjen funktiona viiden kasvihuonekaasuskenaarioiden (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 ja SSP5-8.5; katso kuvaa SPM.4) perusteella. Ennusteet käyttävät syöttötietoina kutakin kasvihuonekaasuskenaariota vastaavia kumulatiivisia CO₂-päästöjä, ja ennustettu ilmaston lämpeneminen ottaa huomioon kaikkien ihmiskunnan ilmastoa muuttavien toimien vaikutuksen. Kuva osoittaa, että TCRE pysyy likimain vakiona koko ajanjakson 1850–2050, jonka kuluessa kumulatiiviset CO₂-päästöt kasvavat monta kertaluokkaa. Tämä yhteys pätee kuitenkin vain niin kauan, kun hiilidioksidin nettomääräiset päästöt ovat positiivisia.

Alempi kuvaosio: Tähänastiset (harmaalla) ja eri kasvihuonekaasuskenaarioita vastaavat tulevat (värillä) yhteenlasketut CO₂-päästöt (GtCO₂) vuoteen 2050 mennessä.

{Kappale 5.5, kuva 5.31, kuva TS.18}

kun ihmisten tuottamat hiilidioksidin nettopäästöt on joskus saatu putoamaan nolnaan.
{ 5.1, 5.5, tekstilaatikko 5.2, TS.3.3 } (taulukko SPM.2)

D.1.3 Useita jäljellä olevaan hiilibudjettiin vaikuttavia tekijöitä on pyritty tätä raporttia varten arvioimaan aikaisempaa tarkemmin, mutta päivitysten vaikutukset ovat jääneet pieniksi. Viime vuosina syntyneillä päästöillä oikaistut arviot ovat näin ollen sopusoinnussa IPCC:n 1,5 asteen lämpenemistä tarkastelevan erikoisraportin tulosten kanssa. V. 2013 arviointiraporttiin verrattuina arviot ovat laskentamenetelmien parantumisen tähden suurentuneet.⁴⁴
{ 5.5, tekstilaatikko 5.2, TS.3.3 } (taulukko SPM.2)

D.1.4 Hiilidioksidia on mahdollista ottaa talteen ilmakehästä keinoitekoisesti ja varastoida niin, että se ei karkaa takaisin. Jos CO₂-päästöt ovat riittävän pieniä, niitä voidaan pyrkiä kompensoimaan keinoite-

⁴⁴Kun verrataan tuloksia edelliseen varsinaiseen arviointiraporttiin ja otetaan huomioon näinä vuosina syntyneet päästöt, tässä raportissa arvioitu jäljellä oleva hiilibudjetti on lämpenemisen 1,5 °C ylärajalla noin 300–350 GtCO₂ suurempi; 2 °C lämpenemisrajalla eroa on noin 400–500 GtCO₂.

Taulukko SPM.2. Arvioidut “luvalliset” jäljellä olevat hiilidioksidipäästöt.

Jäljellä olevat hiilibudjetit on laskettu ajanjaksolle, joka alkaa vuodesta 2020 ja jatkuu siihen asti, kunnes maailmanlaajuiset hiilidioksidin nettopäästöt ovat painuneen nolnaan. Hiilibudjetiteja laskettaessa on otettu huomioon myös muiden kasvihuonekaasujen kuin hiilidioksidin päästöjen vaikutus ilmaston lämpenemisen. Tässä taulukossa tarkasteltu ilmaston lämpeneminen ottaa huomioon ainoastaan ihmisten aiheuttamaan maapallon pintalämpötilan nousun. Luonnollisen vaihtelun vaikutus maapallon lämpötilojen heilahteluihin yksittäisinä vuosina ei siis ole mukana. Vuosina 2010–2019 maapallon keskilämpötila oli 1.07 (0.8–1.3) °C korkeampi kuin jaksolla 1850–1900 keskimäärin. Hiilidioksidipäästöjä kertyi v. 1850–2019 yhteensä 2390±240 GtCO₂.

{ Taulukko 3.1, 5.5.1, 5.5.2, tekstilaatikko 5.2, taulukko 5.1, taulukko 5.7, taulukko 5.8, taulukko TS.3 }

Ilmaston lämpeneminen verrattuna vuosiin 1850–1900 ^a	Ilmaston lämpeneminen verrattuna vuosiin 2010–2019	Arvioidut jäljellä olevat hiilibudjetit vuoden 2020 alusta lukien (GtCO ₂) Todennäköisyys lämpenemisrajan alapuolella pysymiselle ^b				
		17 %	33 %	50 %	67 %	83 %
1.5	0.43	900	650	500	400	300
1.7	0.63	1450	1050	850	700	550
2.0	0.93	2300	1700	1350	1150	900

Laskelmissa oletettua tehokkaammat tai vähäisemmät leikkaukset muitten kasvihuonekaasujen kuin CO₂:n päästöissä voivat lisätä tai vähentää jäljellä olevia hiilibudjetiteja 220 GtCO₂ tai enemmänkin.

^aArvot 0,1 asteen lisälämpenemistä kohden on esitetty pääraportin taulukoissa TS.3 ja 5.8.

^bTämä todennäköisyyslaskelma ottaa huomioon TCRE-parametrin arvoon ja maapallon ilmastojärjestelmän palauteilmiöihin liittyvät epävarmuustekijät. Se kertoo, millä todennäköisyydellä ilmaston lämpeneminen jää kahdessa vasemmanpuoleisessa sarakkeessa annettujen raja-arvojen alapuolelle. Tähänastiseen lämpenemiseen (±550 GtCO₂) ja muiden kasvihuonekaasujen kuin CO₂:n vaikutuksiin (±220 GtCO₂) liittyvät epävarmuustekijät ovat osittain sisällytetyt TCRE:n epävarmuusarvioon. Erikseen taas tarkastellaan niitä epävarmuustekijöitä, jotka liittyvät vuoden 2015 jälkeen syntyneisiin päästöihin (±20 GtCO₂) ja CO₂:n nettopäästöjen loppumisen jälkeen tapahtuvaan lämpenemiseen (±420 GtCO₂).

koisella talteenottamisella niin, että maailmanlaajuiset nettopäästöt saadaan pudotettua nollassa. Jos hiilidioksidia onnistutaan poistamaan oikein tehokkaasti, ihmisten aikaansaamat poistumat jopa voivat ylittää päästöt. Hiilidioksidin talteenottamisella voi kuitenkin olla huomattavia sivuvaikutuksia mm. eri aineitten biogeokemialliseen kiertokulkuun ja ilmastoon. Nämä sivuvaikutukset voivat joko heikentää tai vahvistaa näiden menetelmien kykyä poistaa hiilidioksidia ilmakehästä ja jarruttaa ilmaston lämpenemistä. Talteenotto voi myös vaikuttaa veden saatavuuteen ja laatuun, ruoan tuotannon edellytyksiin ja luonnon monimuotoisuuteen⁴⁵.
{ 5.6, yhdistävä tekstilaatikko 5.1, TS.3.3 }

D.1.5 Hiilidioksidin riittävän voimaperäinen keinotekoinen talteenotto kääntäisi maailmanlaajuiset nettopäästöt negatiivisiksi. Tämä alentaisi ilmakehän CO₂-pitoisuutta ja saisi meren pintakerroksen veden happamoitumisen pysähtymään. Tällöin kuitenkin maa-alueille ja meriin sitoutunutta hiiltä rupeaisi vähitellen vapautumaan takaisin ilmakehään. Sen tähden talteenotto alentaisi ilmakehän CO₂:n määrää ainoastaan suunnilleen niin paljon, kuin vastaavansuuruiset päästöt sitä ovat aikanaan lisänneet. Talteenoton aikaansaama ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden lasku saattaa jäädä jopa 10 %:n verran pienemmäksi kuin samansuuruisen CO₂-päästöjen aiheuttama pitoisuuden nousu; erotus riippuu talteenotetun hiilidioksidin kokonaismäärästä.
{ 5.3, 5.6, TS.3.3 }

D.1.6 Jos hiilidioksidin maailmanlaajuiset nettopäästöt saataisiin käännettyä pysyvästi negatiivisiksi, hiilidioksidin aiheuttama maapallon keskilämpötilan nousu vaihtuisi vähitellen laskuksi. Monet muut ilmastojärjestelmän muutokset kuitenkin jatkuisivat kymmeniä, satoja tai jopa tuhansia vuosia. Esimerkiksi suurillakin negatiivisilla CO₂-päästöillä kestäisi jopa tuhansia vuosia, ennen kuin merenpinta jälleen alkaisi laskea.
{ 4.6, 9.6, TS.3.3 }

D.1.7 Jos ilman saastumisen torjumisen nimissä leikataan samanaikaisesti metaanin, pienhiukkasten ja otsonia synnyttävien yhdisteitten päästöjä, tämä johtaisi ilmaston lämpenemiseen niin lyhyellä kuin pitkälläkin aikavälillä. Kauempana tulevaisuudessa tämä lämpeneminen jää kaikkein vähäisimmäksi niissä skenaarioissa, joissa panostetaan hyvään ilmanlaatuun ja CH₄-päästöjen tehokkaaseen vähentämiseen. Alhaisten kasvihuonekaasupäästöjen skenaarioissa pienhiukkaspäästöjen leikkaukset aiheuttavat lämpenemistä, kun taas CH₄:n ja muiden otsonia synnyttävien kaasujen päästöjen väheneminen vaikuttaisi ilmastoa jäähdyttävästi. Sekä CH₄:n että pienhiukkasten lyhyen eliniän vuoksi näitten päästöjen rajoittamistoimet osittain tasapainottavat toisiaan. Lisäksi CH₄-päästöjen leikkaaminen parantaa ilmanlaatua vähentämällä hengitysilman otsonipitoisuutta.
{ 6.7, tekstilaatikko TS.7 } (kuva SPM.2, tekstilaatikko SPM.1)

D.1.8 Hiilidioksidin aiheuttaman lämpenemisen pysäyttäminen edellyttää, että ihmisten tuottamat maailmanlaajuiset CO₂:n nettopäästöt saadaan pudotettua nolnaan, eli päästöt kyetään tasapainottamaan ihmisten toiminnasta aiheutuvilla hiilidioksidin poistumilla. Tämä ei kuitenkaan vielä tarkoita, että kaikkien kasvihuonekaasujen päästöjen yhteinen lämmitysvaikutus saataisiin pudotettua nollassa; jotta tähän päästäisiin, eri kaasujen ominaislämmitysvaikutuksella painotettujen päästöjen ja poistumien yhteenlasketun vaikutuksen pitäisi olla tasapainossa. Kun tarkastellaan jotakin valittua kasvihuonekaasupäästöjen kehityskulkua, tuloksena saatava ilmastonmuutosvaste⁴⁶ määräy-

⁴⁵Hiilidioksidin talteenoton mahdolliset kielteiset ja myönteiset vaikutukset luonnon monimuotoisuuteen, vesitalouteen ja elintarviketuotantoon riippuvat käytettävästä menetelmästä. Usein nämä sivuvaikutukset riippuvat paljon mm. paikallisista olosuhteista ja alueen aikaisemmasta maankäytöstä. Aihepiiriä tarkastellaan IPCC:n työryhmien II ja III osaraporteissa.

⁴⁶Ilmastonmuutosvaste kertoo, miten ilmastojärjestelmä reagoi säteilypakotteeseen, esimerkiksi paljonko maapallon keskilämpötila nousee päästöjen vaikutuksesta.

tyy kaikkien yksittäisten kasvihuonekaasujen päästöjen perusteella. Vastaavasti eri kasvihuonekaasujen päästöjen ja poistumien yhteisvaikutuksen laskemiseen käytettävän päästömittarin⁴⁷ valinta vaikuttaa siihen, minä ajankohtana kasvihuonekaasujen yhteenlasketun vaikutuksen voidaan katsoa laskeneen nollatasolle. Sellaisen päästöjen kehityskulun, joka jossakin vaiheessa tulevaisuudessa pudottaa kasvihuonekaasupäästöjen nettovaikutuksen nolaksi (käyttäen kullekin kaasulle 100 vuoden ominaislämmitysvaikutusta), ennustetaan aikanaan myös kääntävän maapallon keskilämpötilan nousun laskuksi.

{4.6, 7.6, tekstilaatikko 7.3, TS.3.3}

D.2 Sellaisissa skenaariossa, joissa päästöjä leikataan tehokkaasti (SSP1-1.9 ja SSP1-2.6), kasvihuonekaasu- ja pienhiukkaspitoisuudet ovat jo muutaman vuoden aikavälillä pienempiä ja ilmanlaatu parempaa kuin korkeiden kasvihuonekaasupäästöjen skenaarioissa (SSP3-7.0 tai SSP5-8.5). Havaittavissa olevia eroja maapallon keskilämpötilan trendeissä alkaisi ilmetä luonnollisen vaihtelun taustahälyn joukosta noin 20 vuoden sisällä. Monien muitten muutosten (esim. sademäärien muutokset) erot skenaarioitten välillä tulevat esille vasta pitemmällä aikavälillä.

{4.6, 6.6, 6.7, yhdistävä tekstilaatikko 6.1, 9.6, 11.2, 11.4, 11.5, 11.6, yhdistävä tekstilaatikko 11.1, 12.4, 12.5} (kuva SPM.8, kuva SPM.10)

D.2.1 Pyrkimykset hillitä COVID-19-virustaudin leviämistä vuonna 2020 leikkasivat päästöjä tilapäisesti. Tämä samalla vähensi ilman saastumista ja hieman voimisti ilmastoa lämmittävää säteilypakotetta, mikä johtui pääasiassa pienhiukkasten aiheuttaman jäähdytyksen heikentymisestä. Näin pieni ja lyhytaikainen säteilypakotteen muutos ei kuitenkaan vaikuta ilmastoon niin paljoa, että sitä pystyttäisiin erottamaan ilmaston luonnollisen vaihtelun joukosta. Ilmakehän CO₂-pitoisuus jatkoi nousuaan myös vuonna 2020, ilman että pitoisuuden kasvuvauhdin olisi voitu osoittaa hidastuneen.⁴⁸

{Yhdistävä tekstilaatikko 6.1, TS.3.3}

D.2.2 Kasvihuonekaasupäästöjen leikkaaminen parantaa samalla ilman laatua. Lähitulevaisuudessa⁴⁹ paraneminen ei kuitenkaan ole edes alhaisten kasvihuonekaasupäästöjen skenaarioissa (SSP1-2.6 ja SSP1-1.9) riittävää, jotta kaikkein saastuneimmilla alueilla voitaisiin saavuttaa Maailman terveysjärjestön ilmanlaatuohjeiston edellyttämä taso. Skenaarioissa, joissa ilman epäpuhtauspäästöjä oletetaan leikattavan tehokkaasti, ilmanlaatu paranisi nopeammin kuin sellaisissa skenaarioissa, joissa tähdätään pelkästään kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen. Niissä skenaarioissa, joissa panostetaan sekä ilmansaasteiden että kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämiseen, ilmanlaadun ennustetaan yhä paranevan vuoden 2040 jälkeen, ei kylläkään samaa vauhtia kaikkialla maailmassa.

{6.6, 6.7, tekstilaatikko TS.7}.

D.2.3 Niissä skenaarioissa, joissa kasvihuonekaasupäästöt ovat alhaisia (SSP1-1.9 ja SSP1-2.6), ilmastomuutos hidastuu nopeasti; toisin käy suurten päästöjen skenaarioissa (SSP3-7.0 tai SSP5-8.5). Kuitenkin alkuvaiheessa skenaarioitten väliset erot ilmaston lämpiämisessä voivat jäädä luonnollisten vaihtelujen varjoon. Maapallon keskilämpötilan 20-vuotisissa muutostrendeissä ero yhtäältä SSP1-1.9-skenaariosta ja toisaalta SSP3-7.0- tai SSP5-8.5-skenaariosta välillä ilmeni todennäköisesti jo lähitulevaisuudessa. Monien muiden ilmastomuuttujien vaste erottuisi luonnollisen vaihtelun

⁴⁷Päästömittarin ("emission metric") valinta riippuu siitä, mitä tarkoitusta varten eri kaasujen ja muitten ilmastoa muuttavien pakotetekijöitten vaikutuksia verrataan. Tässä raportissa päästömittarien arvoja on päivitetty.

⁴⁸Muiden kasvihuonekaasujen pitoisuuksien kasvunopeuksien mahdollisesta muuttumisesta vuonna 2020 ei tätä arviointiraporttia laadittaessa ollut saatavilla riittävästi tutkimustietoa.

⁴⁹Lähitulevaisuus tarkoittaa tässä vuosia 2021–2040

aiheuttamasta hälystä vasta myöhemmin tällä vuosisadalla.

{4.6, yhdistävä tekstilaatikko TS.1} (kuva SPM.8, kuva SPM.10)

D.2.4 Alhaisten kasvihuonekaasupäästöjen skenaarioissa (SSP1-1.9 ja SSP1-2.6) erilaisten ilmastollisten vaikutusilmiöitten esiintymisen muutokset olisivat vuoden 2040 jälkeen huomattavasti pienempiä kuin suurten päästöjen skenaarioissa (SSP3-7.0 ja SSP5-8.5). Tarkasteltaessa vuosisadan lopun ilmasto skenaarioitten väliset erot kasvavat vieläkin suuremmiksi. Tällaisia vaikutusilmiöitä ovat mm. runsaat sateet ja tulvat, vaarallisen korkeitten lämpötilan kynnysarvojen ylittymiset sekä tilanteet, joissa meren pinta nousee hyvin korkealle. Samalla niiden alueiden lukumäärä, joilla tällaisia ilmiöitä esiintyy, lisääntyisi pienten päästöjen skenaarioissa vähemmän kuin jos kasvihuonekaasujen päästöt yhä jatkaisivat kasvuaan. Muutokset ovat kaiken kaikkiaan sitä pienempiä mitä alhaisempien kasvihuonekaasupäästöjen skenaariota tarkastellaan.

{9.6, 11.2, 11.3, 11.4, 11.5, 11.6, 11.9, yhdistävä tekstilaatikko 11.1, 12.4, 12.5, TS.4.3}